



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNO DIEGO DE MORAIS

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS
RASOS ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA NA FORMAÇÃO BARREIRAS**

RECIFE

2022

BRUNO DIEGO DE MORAIS

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS
RASOS ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA NA FORMAÇÃO BARREIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

RECIFE

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- M828a Moraes, Bruno Diego de.
 Análise da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rasos através de modelo matemático em uma bacia hidrográfica na formação barreiras / Bruno Diego de Moraes. - 2022.
 297 folhas, il.; tab.
- Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.
- Inclui referências, apêndice e anexos.
1. Engenharia Civil. 2. Caracterização geotécnica. 3. Análise de suscetibilidade. 4. Modelo TRIGS. I. Coutinho, Roberto Quental (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-242

BRUNO DIEGO DE MORAIS

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS
RASOS ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA NA FORMAÇÃO BARREIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 22/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Roberto Quental Coutinho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Rodolfo Moreda Mendes (Examinador Externo)
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

Profº. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo (Examinador Externo)
Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais e todas as pessoas que amo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que abriu todos os caminhos e permitiu a realização dessa pesquisa. Agradeço também aos meus pais e a minha irmã pelo exemplo de humildade, perseverança e integridade. Agradeço a minha família de modo geral, seja ela de sangue ou de consideração, pois todos contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização desse sonho, me mostrando que ninguém faz nada sozinho. Agradeço de forma especial a minha família que reside em Recife-PE por me acolheu durante essa fase, sem vocês esse mestrado não seria possível.

Ao professor Roberto Quental Coutinho, pela orientação e transmissão de conhecimento e oportunidades de aprendizado. Agradeço também ao GEGEP por todo suporte e o financiamento desta pesquisa e a Universidade Federal de Pernambuco.

A todos os amigos que encontrei ao longo do caminho em princípio Felipe Brandão que me ajudou a encontrar a sala correta no primeiro dia. A Ana Karine e a icônica casa verde, local de muitos aperreios e risos. Também não poderia deixar de citar Carlos, Danilo, Maristela e Raíza Bezerra.

A todos os amigos do GEGEP que chegaram depois, mas nem por isso são menos especiais. Entre eles cito: Tahyara, Danisete, Carlla, Manoely, Claudinha, Betânia Iran, Juciela, Mayssa, Hugo, Cristiane, Bruno Andrade, Erisângela, Gilmar, Marília, Bruno Conde e Wilson.

Em especial agradeço a Tayhara pelas conversas edificantes e pelo ser humano especial; a Danisete pelas inúmeras vezes que me ajudou; a Carlla companheira de muitos sufocos e gargalhadas; a Manoely e a Claudinha por simplesmente serem quem são; a Hugo pela paciência nas visitas de campo; a Iran por todos os cafés; a Betânia pela contribuição prestada para esta dissertação e por sempre procurar me ajudar.

Aos funcionários do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, em particular ao Francisco e ao Gutemberg por todo suporte durante a realização dos ensaios que compuseram essa dissertação.

As secretárias da Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPE, Andréa e Juliana, por todo suporte e avisos ao longo do curso. Por fim, quero deixar meu agradecimento a todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

A Região Metropolitana do Recife (RMR) é bastante conhecida devido à frequente ocorrência de movimentos de massa em meses chuvosos, apresentando um vasto histórico de deslizamentos com vítimas fatais, não-fatais e destruição de imóveis ao longo dos anos. A área de estudo dessa dissertação compreende uma dessas regiões susceptíveis a deslizamentos da RMR e trata-se de uma bacia hidrográfica que abrange áreas dos municípios de Recife-PE e Jaboatão dos Guararapes-PE. Face à fragilidade desse local, os objetivos desta dissertação são: caracterizar geotecnicamente os solos da área de estudo; elaborar um registro dos deslizamentos; desenvolver mapas de suscetibilidade a deslizamentos utilizando o modelo TRIGRS; e analisar a precisão das análises realizadas por meio do método LR-class. Para isso, as análises de suscetibilidade foram divididas em dois cenários: Cenário A, considerando os parâmetros geotécnicos constantes para toda área; e Cenário B, considerando os parâmetros geotécnicos espacializados em uma área menor. Em cada cenário foram realizadas análises utilizando o modelo de infiltração saturada (SAT) e não saturada (NSAT). Além disso, para cada cenário também foi assumido três profundidade distintas do solo (z_{max}) para cálculo do fator de segurança e poropressão, iguais a 1, 2 e 3m. O perfil geotécnico determinado por meio da sondagem SPT se revelou predominantemente arenoso sendo coerentes com os perfis disponíveis na literatura. Os resultados dos ensaios de laboratório apresentaram valores dentro do intervalo esperados para os solos da área de estudo. As análises realizadas com o modelo TRIGRS mostraram que a área classificada como instável coincidiu com o relevo mais elevado e íngreme da área de estudo. O modelo de infiltração não saturada gerou resultados mais precisos de modo que quanto maior o z_{max} e a profundidade inicial do nível de água, maior foi o efeito da sucção na camada não saturada. Nas análises do Cenário B foi observado uma porcentagem de área instável 17% menor em relação ao Cenário A, devido a variação dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos dentro da área de estudo. O método LR-class demonstrou que o modelo apresentou resultados coerentes com a localização dos deslizamentos, indicando que as análises ANSAT3 ($\%LR \text{ FS} \leq 1 = 81,23\%$) e BNSAT2 ($\%LR \text{ FS} \leq 1 = 78,47\%$) foram as mais precisas.

Palavras-chave: caracterização geotécnica; análise de suscetibilidade; modelo trigrs.

ABSTRACT

The Recife Metropolitan Region (RMR) is well known due to the occurrence of mass movements during the rainy months and presents a vast history of landslides with fatal, non-fatal victims and destruction of properties over the years. The study area of this thesis is one of these regions susceptible to landslides in the RMR and it is a drainage basin that includes areas of the cities of Recife-PE and Jaboatão dos Guararapes-PE. Given the fragility of this site, the purpose of this thesis are: to geotechnically characterize the soils of the study area; create a record of landslides; develop landslide susceptibility maps using the TRIGRS model; and analyze the performance and precision of the analyzes performed using the LR-class method. For this, the susceptibility analyzes were divided into two scenarios: Scenario A, considering the constant geotechnical parameters for the entire area; and Scenario B, considering the geotechnical parameters spatialized in a smaller area. In each scenario, analyzes were performed using the saturated (SAT) and unsaturated (NSAT) infiltration model. In addition, for each scenario, three different soil depths (z_{max}) were also assumed to calculate the safety factor and pore pressure, equal to 1, 2, and 3m. The geotechnical profile determined through SPT sounding proved to be predominantly sandy, being consistent with the profiles available in the literature. The results of the laboratory tests presented values within the expected range for the soils of the study area. The analyzes carried out with the TRIGRS model showed that the area classified as unstable coincided with the highest and steepest relief in the study area. The unsaturated infiltration model generated more accurate results so that the greater the z_{max} and the initial depth of the water level, the greater the effect of suction on the unsaturated layer. In the analysis of Scenario B, a percentage of unstable area 17% lower was observed about Scenario A, due to the variation of geotechnical and hydrological parameters within the study area. The LR-class method showed that the model presented results consistent with the location of the landslides, indicating that the ANSAT3 (%LR $FS \leq 1 = 81.23\%$) and BNSAT2 (%LR $FS \leq 1 = 78.47\%$) analyzes were the most accurate.

Keywords: geotechnical characterization; susceptibility analysis; trigrs model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Composição de um talude.....	28
Figura 2 -	Tipos de talude.....	29
Figura 3 -	Queda.....	34
Figura 4 -	Tombamento.....	35
Figura 5 -	Deslizamento rotacional.....	36
Figura 6 -	Deslizamento planar.....	37
Figura 7 -	Expansão lateral.....	38
Figura 8 -	Fluxo de detritos.....	38
Figura 9 -	Rastejo (“creep”)	39
Figura 10 -	a) Método das fatias; b) Forças na fatia genérica.....	46
Figura 11 -	Talude infinito e superfície de ruptura planar.....	47
Figura 12 -	a) Envoltória de resistência de solos não saturados; b) Projeção horizontal no plano τ x $(u_a - u_w)$ para diferentes valores de sucção.....	49
Figura 13 -	Bacia do rio Limoeiro, São Paulo (SP): a) Mapa das áreas de risco de deslizamento da Bacia do Rio Limoeiro; b) Mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo SHALSTAB.....	53
Figura 14 -	Resultados de FS simulados pelo modelo TRIGRS.....	55
Figura 15 -	Modelo esquemático de TRIGRS.....	66
Figura 16 -	Seções esquemáticas mostrando as condições de contorno assumidas pelas Equações 6 e 7.....	67
Figura 17 -	Condições iniciais não saturada do solo em encostas.....	70
Figura 18 -	Localização da área de estudo.....	80
Figura 19 -	Bairros interceptados pela área de estudo.....	81
Figura 20 -	Posição dos pluviômetros automáticos do CEMADEN em relação a área de estudo.....	83
Figura 21 -	Precipitações: (a) mensais e (b) anuais registradas no período de 2016 a 2021 e a média do período (pluviômetro Ibura)	84
Figura 22 -	Precipitações: (a) mensais e (b) anuais registradas no período de 2015 a 2021 e a média do período (pluviômetro Alto da Bela Vista)	85
Figura 23 -	Mapa geológico da área de estudo.....	86
Figura 24 -	Distribuição da Formação Barreiras ao longo da costa brasileira, com suas respectivas altitudes.....	87
Figura 25 -	Mapa geomorfológico da área de estudo.....	90
Figura 26 -	Mapa altimétrico da área de estudo com curvas de nível.....	92
Figura 27 -	Mapa de declividade da área de estudo.....	93

Figura 28 -	Mapa de risco a deslizamento para Comunidade de Lagoa Encantada, bairro COHAB, município Recife – PE.....	95
Figura 29 -	Cicatriz de deslizamento planar na rua Dr. Paulo de BÍase, Recife-PE.....	96
Figura 30 -	Deslizamento na localidade Pantanal, COHAB, em 24/07/19: a) e b) Encosta; c) e d) Trincas e fissuras nas paredes da residência localizada no topo da encosta.....	97
Figura 31 -	Deslizamento na rua São Xavier: a) Imagem do deslizamento; b) Detalhe da ruptura e indicação da formação de blocos.....	97
Figura 32 -	Deslizamento na localidade Pantanal, COHAB, em 24/07/19: a) Ruptura; b) Destruição da residência atingida.....	98
Figura 33 -	Deslizamento na rua Alto Santa Izabel em 13/06/19.....	98
Figura 34 -	Deslizamento na rua Alto Santa Izabel em junho de 2020.....	99
Figura 35 -	Deslizamento na avenida Chapada do Araripe em maio de 2021.....	100
Figura 36 -	Distribuição mensal do número de ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos médios entre os anos de 2014 a 2020 na área de estudo.....	101
Figura 37 -	Distribuição anual do número de ocorrências de deslizamentos de 2014 a 2020 na área de estudo.....	102
Figura 38 -	Distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos de forma mensal em: (a) 2014; (b) 2015; (c) 2016; (d) 2017; (e) 2018; (f) 2019; (g) 2020 na área de estudo.....	103
Figura 39 -	Número de ocorrências de deslizamento por bairro interceptado pela área de estudo.....	104
Figura 40 -	Mapeamento anual das ocorrências de deslizamento.....	105
Figura 41 -	Esquema das etapas da investigação geológico-geotécnica.....	108
Figura 42 -	Localização dos pontos de estudos realizados pelo GEGEP/UFPE e GEGEP/CEMADEN.....	110
Figura 43 -	Localização dos ensaios realizados em campo no ponto P-11.....	114
Figura 44 -	Detalhe da encosta (ponto P-11)	115
Figura 45 -	Lançamento de águas servidas diretamente na encosta.....	116
Figura 46 -	Lançamento de lixo e processo de formação de blocos arenosos.....	116
Figura 47 -	Deslizamento ocorrido em junho de 2019: a) Ruptura; b) Material deslizado.....	117
Figura 48 -	Mapa altimétrico da área de estudo com localização dos pontos de estudo.....	119
Figura 49 -	Coleta de amostras deformadas por meio do trado no ponto P-8: a) processo de tradagem; b) coleta de solo; c) identificação das amostras.....	121

Figura 50 -	Execução do Ensaio SPT no ponto P-11.....	122
Figura 51 -	Procedimento de instalação e realização do ensaio com o permeâmetro de Guelph: a) realização do furo com o trado, b) instalação do equipamento, c) realização das leituras durante o ensaio.....	123
Figura 52 -	Curvas para obtenção do parâmetro C.....	124
Figura 53 -	Procedimento de coleta de amostra indeformada: a) moldagem do bloco; b) cobertura com papel filme; c) cobertura com papel alumínio; d) cobertura com tecido de algodão.....	126
Figura 54 -	Realização do ensaio de sedimentação com adição de defloculante nas amostras coletadas no ponto P-7.....	129
Figura 55 -	Procedimento de coleta de amostra indeformada: a) Martelo de borracha; b) ponteira de borracha; c) Aparato utilizado para coleta do solo; d) Abertura do furo por meio do trado; e) Cravação da bucha por meio dos golpes do martelo; f) Processo de corte da amostra.....	131
Figura 56 -	Etapas do ensaio para determinação da sucção por meio da mesa de tensão: a) preparação da amostra com telas de náilon e elástico; b) processo de saturação do solo por capilaridade; c) Realização do ensaio com mesa de tensão coberta.....	132
Figura 57 -	Etapas para determinação da sucção mediante o emprego da técnica do papel filtro: a e b) determinação da sucção total (papel filtro em contato com solo); c e d) determinação da sucção mátrica (papel filtro sem contato com o solo); e) amostra embrulhada com filme de PVC; f) amostra embrulhada com papel alumínio.....	133
Figura 58 -	Localização dos parâmetros de ajuste do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) na curva característica bimodal.....	135
Figura 59 -	Etapas de realização do ensaio de adensamento: a) e b) moldagem e nivelamento do corpo de prova; c) prensas de adensamento utilizadas.....	136
Figura 60 -	Etapas de realização do ensaio de cisalhamento direto: a) moldagem do corpo de prova; b) realização do ensaio na prensa de cisalhamento; c) amostra cisalhada após o ensaio.....	137
Figura 61 -	Composição das PCD Geotécnicas.....	139
Figura 62 -	Procedimentos para instalação da sonda do tipo EnviroScan: a) abertura do furo; b) acondicionamento dos sensores no tubo de PVC; c) preparação do slurry com caulinita; d) inserção do slurry no furo; e) inserção da sonda no furo; f) finalização.....	140
Figura 63 -	PCD instalada no ponto P-11.....	141
Figura 64 -	Mapa de localização das áreas analisadas no Cenário A e B.....	143

Figura 65 -	Esquema das análises de suscetibilidade realizadas.....	146
Figura 66 -	Precipitações mensais do ano de 2019 e a média mensal do período entre 2016 e 2021 registrado pelo pluviômetro Ibura.....	147
Figura 67 -	Distribuição das ocorrências de deslizamentos e pluviometria diária de junho de 2019.....	148
Figura 68 -	Chuva horária do dia 13/06/2019 aferida pelo pluviômetro Ibura.....	148
Figura 69 -	Chuva horária do dia 17/06/2019 aferida pelo pluviômetro Ibura.....	149
Figura 70 -	Perfil de umidade gravimétricas dos pontos a) P-07; b) P-08; c) P-09; d) P-11.....	153
Figura 71 -	Perfil de umidade volumétrica dos pontos a) P-07; b) P-08; c) P-09; d) P-11.....	153
Figura 72 -	Descrição da sondagem SPT e perfil de umidade.....	154
Figura 73 -	Resultados dos coeficientes de permeabilidades obtidas “in situ”, potencial mátrico e umidade inicial e final.....	156
Figura 74 -	Curvas granulométricas (com e sem defloculante). Prof.: 0,70 a 1,00 m.....	158
Figura 75 -	Curvas características do ponto P-7 em umidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 7.1; b) 7.2; c) 7.3; d) 7.4 e e) 7.5.....	164
Figura 76 -	Curvas características do ponto P-8 em umidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 8.1; b) 8.2; c) 8.4 e d) 8.5.....	165
Figura 77 -	Curvas características do ponto P-9 em umidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 9.1; b) 9.2; c) 9.3; d) 9.4; e) 9.5 e f) 9.6.....	166
Figura 78 -	Curvas características do ponto P-11 em umidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 11.1; b) 11.2; c) 11.3; d) 11.4 e e) 11.5.....	167
Figura 79 -	Curvas características do ponto P-7 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 7.1; b) 7.2; c) 7.3; d) 7.4 e e) 7.5.....	168
Figura 80 -	Procedimentos para instalação da sonda do tipo EnviroScan: a) abertura do furo; b) acondicionamento dos sensores no tubo de PVC; c) preparação do slurry com caulinita; d) inserção do slurry no furo; e) inserção da sonda no furo; f) finalização.....	169
Figura 81 -	Curvas características do ponto P-9 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 9.1; b) 9.2; c) 9.3; d) 9.4; e) 9.5 e f) 9.6.....	170

Figura 82 -	Curvas características do ponto P-11 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 11.1; b) 11.2; c) 11.3; d) 11.4 e e) 11.5.....	171
Figura 83 -	Deformações volumétricas versus tensão vertical (E_v versus $\log \sigma_v$) e índice de vazios versus a tensão vertical (e versus $\log \sigma_v$)	175
Figura 84 -	Potencial de colapso versus tensão vertical.....	178
Figura 85 -	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto, para as condições de umidade: a) natural e b) inundado.....	179
Figura 86 -	Envoltória de resistência do ensaio de cisalhamento direto realizado no ponto P-11.....	180
Figura 87 -	Variação da umidade média diária do solo com a precipitação no ponto P-07 entre outubro e dezembro de 2019.....	183
Figura 88 -	Variação da umidade média diária do solo com a precipitação no ponto P-08 entre junho de 2019 e outubro de 2021.....	184
Figura 89 -	Variação da umidade média diária do solo com a precipitação no ponto P-11 entre junho de 2019 e setembro de 2021.....	185
Figura 90 -	Perfil da umidade média diária do solo no ponto P-07: a) período seco entre final de 2019 e início de 2020; b) período úmido de 2020; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas.....	186
Figura 91 -	Perfil da umidade média diária do solo no ponto P-08: a) período seco entre final de 2019 e início de 2020; b) período úmido de 2020; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas.....	186
Figura 92 -	Perfil da umidade média diária do solo no ponto P-08: a) período seco entre final de 2020 e início de 2021; b) período úmido de 2021; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas.....	187
Figura 93 -	Perfil de umidade do solo no ponto P-11: a) período úmido; b) período seco; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Perda em % da umidade do período mais úmido para o período mais seco.....	188
Figura 94 -	Perfil de umidade do solo no ponto P-11: a) período úmido; b) período seco; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Perda em % da umidade do período mais úmido para o período mais seco.....	188
Figura 95 -	Curva característica utilizada no Cenário A ajustada através do modelo de Gardner (1958)	194

Figura 96 - Curva característica utilizada no Cenário A ajustada através do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004)	195
Figura 97 - Zonas geotécnicas.....	197
Figura 98 - Curvas características utilizadas na modelagem ajustadas através do modelo de Gardner (1958): a) Zona 1; b) Zona 2; c) Zona 3 e d) Zona 4.....	199
Figura 99 - Curva característica utilizada na modelagem ajustadas através do modelo de Gardner (1958): a) Zona 1; b) Zona 2; c) Zona 3 e d) Zona 4.....	200
Figura 100 - Análise ASAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	202
Figura 101 - Análise ASAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	204
Figura 102 - Análise ASAT1: Variação da poropressão com a precipitação.....	205
Figura 103 - Análise ASAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	206
Figura 104 - Análise ASAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	207
Figura 105 - Análise ASAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	209
Figura 106 - Análise ASAT2: Variação da poropressão com a precipitação.....	210
Figura 107 - Análise ASAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	211
Figura 108 - Análise ASAT3: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	212
Figura 109 - Análise ASAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	214
Figura 110 - Análise ASAT3: Variação da poropressão com a precipitação.....	215
Figura 111 - Análise ASAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	216
Figura 112 - Análise ANSAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	217
Figura 113 - Análise ANSAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	219
Figura 114 - Análise ANSAT1: Variação da poropressão com a precipitação.....	220
Figura 115 - Análise ANSAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	221
Figura 116 - Análise ANSAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	222

Figura 117 - Análise ANSAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	224
Figura 118 - Análise ANSAT2: Variação da poropressão com a precipitação.....	225
Figura 119 - Análise ANSAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	226
Figura 120 - Análise ANSAT3: Relação entre a % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação.....	227
Figura 121 - Análise ANSAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	229
Figura 122 - Análise ANSAT3: Variação da poropressão com a precipitação.....	230
Figura 123 - Análise ANSAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	231
Figura 124 - Comparação da $\%LRFS \leq 1$ para as análises do Cenário A.....	232
Figura 125 - Análise BSAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	235
Figura 126 - Análise BSAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	237
Figura 127 - Análise BSAT1: Variação da poropressão com a precipitação.....	238
Figura 128 - Análise BSAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	239
Figura 129 - Análise BSAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	240
Figura 130 - Análise BSAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	242
Figura 131 - Análise BSAT2: Variação da poropressão com a precipitação.....	243
Figura 132 - Análise BSAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	244
Figura 133 - Análise BSAT3: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	245
Figura 134 - Análise BSAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	247
Figura 135 - Análise BSAT3: Variação da poropressão com a precipitação.....	248
Figura 136 - Análise BSAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	249
Figura 137 - Análises BNSAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	250
Figura 138 - Análises BNSAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	252

Figura 139 - Análises BNSAT1: Variação da poropressão com a precipitação.....	253
Figura 140 - Análise BNSAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	254
Figura 141 - Análise BNSAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	255
Figura 142 - Análise BNSAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	257
Figura 143 - Análise BNSAT2: Variação da poropressão com a precipitação.....	258
Figura 144 - Análise BNSAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	259
Figura 145 - Análise BNSAT3: Relação entre a % de área instável e a precipitação.....	260
Figura 146 - Análise BNSAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.....	262
Figura 147 - Análise BNSAT3: Variação da poropressão com a precipitação....	263
Figura 148 - Análise BNSAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.....	264
Figura 149 - Comparação da $\%LRFS \leq 1$ para as análises do Cenário B.....	265

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Sistema de classificação de movimentos de massa proposto por Varnes (1978), adaptado por Hungr, Leroueil e Picarelli (2014)	32
Tabela 2 -	Principais condicionantes dos movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.....	40
Tabela 3 -	Fatores influentes na estabilidade de taludes.....	40
Tabela 4 -	Lista das causas dos deslizamentos de terra.....	41
Tabela 5 -	Condição de estabilidade do talude em função do FS.....	43
Tabela 6 -	Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de massa.....	44
Tabela 7 -	Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	45
Tabela 8 -	Formulações baseadas no método das fatias.....	46
Tabela 9 -	Modelos determinísticos para análise de suscetibilidade a deslizamentos raros.....	51
Tabela 10 -	Parâmetros de entrada para cada modelo.....	51
Tabela 11 -	Resumo das principais experiências brasileiras na aplicação de modelos matemáticos para o desenvolvimento de mapas de suscetibilidade.....	57
Tabela 12 -	Arquivos de entrada do TRIGRS.....	73
Tabela 13 -	Parâmetros atribuídos a cada zona de propriedade.....	74
Tabela 14 -	Arquivos de saída do TRIGRS.....	75
Tabela 15 -	LR class de pesquisas realizadas com TRIGRS.....	77
Tabela 16 -	Validação realizada por Park, Nikhil e Lee (2013)	78
Tabela 17 -	Precipitações mensais e anuais do pluviômetro Ibura (período de 2016 a 2021)	84
Tabela 18 -	Precipitações mensais e anuais do pluviômetro Alto da Bela Vista (período de 2015 a 2021)	85
Tabela 19 -	Classes de declividade.....	91
Tabela 20 -	Localização dos estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE e pelo GEGEP/CEMANDEN.....	109
Tabela 21 -	Ensaio de campo de estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE.....	111
Tabela 22 -	Ensaio de laboratório de estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE.....	111
Tabela 23 -	Ensaio de campo de estudos posteriores realizados pelo GEGEP/CEMANDEN.....	112
Tabela 24 -	Quantitativo dos ensaios de campo realizados pelo GEGEP/CEMANDEN.....	112

Tabela 25 - Ensaaios de laboratório de estudos posteriores realizados pelo GEGEP/CEMADEN.....	112
Tabela 26 - Quantitativo dos ensaios de laboratório realizados pelo GEGEP/CEMADEN.	113
Tabela 27 - Ensaaios de campos realizados pelo GEGEP no ponto P-11.....	113
Tabela 28 - Ensaaios de laboratório realizados pelo GEGEP no ponto P-11.....	113
Tabela 29 - Altimetria dos pontos de estudo.....	118
Tabela 30 - Informações das sondagens a trado realizadas na área de estudo pelo GEGEP/CEMADEN.	120
Tabela 31 - Valores de α segundo o tipo de solo.....	125
Tabela 32 - Informações dos ensaios de caracterização física realizados pelo GEGEP/CEMADEN.	127
Tabela 33 - Informações das amostras indeformadas coletadas pelo GEGEP/CEMADEN para determinação da curva característica do solo.	130
Tabela 34 - Localização das PCDs Geotécnicas instaladas na área de estudo.	138
Tabela 35 - Umidade gravimétrica das amostras de solo coletadas por meio de sondagem manual a trado.....	152
Tabela 36 - Valores dos coeficientes de permeabilidades saturadas, potenciais mátricos e as umidades iniciais e finais do solo.	155
Tabela 37 - Valores dos coeficientes de permeabilidade de pesquisas realizadas na área de estudo.....	157
Tabela 38 - Caracterização de solos da formação barreiras da área de estudo.	161
Tabela 39 - Parâmetros de ajustes do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) das curvas características dos pontos P-07, P-08, P-09 e P-11.....	172
Tabela 40 - Estimativa da sucção do solo por meio da umidade de amostras coletadas em campo.....	174
Tabela 41 - Condições iniciais e finais dos corpos de prova utilizados nos ensaios.....	175
Tabela 42 - Resumo dos resultados dos ensaios EDI e EDN.....	176
Tabela 43 - Classificação da colapsibilidade do solo segundo Reginatto e Ferrero (1973)	177
Tabela 44 - Valores dos potenciais de colapso dos ensaios edométricos duplos.....	177
Tabela 45 - Condições iniciais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.....	178
Tabela 46 - Condições dos corpos de prova na ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.....	180

Tabela 47 -	Parâmetros de resistência obtidos por meio do cisalhamento direto nas pesquisas realizadas na área de estudo.....	182
Tabela 48 -	Estimativa da sucção do solo por meio da umidade aferidas pelas PCDs Geotécnicas do dia mais chuvoso do intervalo de tempo modelado no TRIGRS.....	189
Tabela 49 -	Tabela de integração dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados.....	191
Tabela 50 -	Média dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos definidos por Meira (2008)	192
Tabela 51 -	Parâmetros geotécnicos utilizados no cenário A.....	193
Tabela 52 -	Parâmetros de ajustes do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) da curva característica utilizada no Cenário A.....	195
Tabela 53 -	Parâmetros geotécnicos utilizados no cenário B.....	198
Tabela 54 -	Parâmetros de ajuste do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) das curvas características utilizadas no Cenário B.....	201
Tabela 55 -	Análise ASAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	203
Tabela 56 -	Análise ASAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	208
Tabela 57 -	Análise ASAT3: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	213
Tabela 58 -	Análise ANSAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	218
Tabela 59 -	Análise ANSAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	223
Tabela 60 -	Análise ANSAT3: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	228
Tabela 61 -	Análise BSAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento raso por meio do método LR Class.....	236
Tabela 62 -	Análise BSAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento raso por meio do método LR Class.....	241
Tabela 63 -	Análise BSAT3: Validação do mapa de suscetibilidade por meio do método LR Class.....	246
Tabela 64 -	Análises BNSAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento rasos por meio do método LR Class.....	251
Tabela 65 -	Análise BNSAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR Class.....	256
Tabela 66 -	Análise BNSAT3: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento rasos por meio do método LR Class.....	261

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS E IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	23
1.2 - OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	26
1.3 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
2 - MOVIMENTOS DE MASSA E ANÁLISE DE SUSTEBILIDADE REGIONAL A DESLIZAMENTOS RASOS.....	28
2.1 - TIPOS DE TALUDE.....	28
2.2 - MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA E SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO.....	29
2.3 - CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA POR HUNGR, LEROUEIL E PICARELLI (2014).....	31
2.3.1 - Quedas.....	34
2.3.2 - Tombamentos.....	34
2.3.3 - Deslizamentos.....	35
2.3.3.1 - Deslizamentos rotacionais.....	35
2.3.3.2 - Deslizamentos planares.....	36
2.3.3.3 - Deslizamentos em cunha.....	37
2.3.4 - Expansões laterais.....	37
2.3.5 - Fluxos.....	38
2.3.6 - Deformação de taludes.....	39
2.4 - CAUSAS E CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA..	39
2.5 - ESTABILIDADE DE TALUDES.....	42
2.5.1 - Métodos de análise de estabilidade de talude.....	45
2.5.1.1 - Método das fatias.....	45
2.5.1.2 - Método do talude infinito.....	47
2.5.2 - Influência da sucção na estabilidade de taludes.....	48
2.6 - DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	49
2.6.1 - Experiência nacional e internacional no desenvolvimento de mapas de suscetibilidade através de modelos matemáticos.....	52
2.7 - SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	64
3 - O MODELO TRIGRS.....	65
3.1 - APRESENTAÇÃO.....	65
3.2 - BASE TEÓRICA DO MODELO.....	66
3.2.1 - Modelo Hidrológico.....	67

3.2.1.1 - Modelo de infiltração para condições iniciais saturadas.....	67
3.2.1.2 - Modelo de infiltração para condições iniciais não saturadas.....	69
3.2.1.3 - Infiltração, Escoamento e Roteamento.....	71
3.2.2 - Modelo de Estabilidade.....	72
3.3 - DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	73
3.4 - DADOS DE SAÍDA DO MODELO.....	74
3.5 - LIMITAÇÕES.....	75
3.6 - VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS - LR Class.....	76
3.7 - SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	78
4 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	79
4.1 - ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	79
4.1.1 - Aspectos Climáticos.....	82
4.1.2 - Aspectos Geológicos.....	85
4.1.3 - Aspectos Geomorfológicos.....	88
4.1.4 - Mapeamento de risco na área de estudo.....	94
4.2 - HISTÓRICO DE DESLIZAMENTO NA ÁREA DE ESTUDO.....	96
4.3 - MAPA DE OCORRÊNCIAS DE DESLIZAMENTOS.....	103
4.4 - SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	106
5 - METODOLOGIA DA CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE.....	107
5.1 - CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.....	107
5.1.1 - Coleta de informações.....	108
5.1.1.1 - Estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE.....	111
5.1.1.2 - Estudos posteriores realizados pelo GEGEP/CEMADEN.....	111
5.1.1.3 - Caracterização geológico-geotécnica do ponto P-11.....	113
5.1.2 - Investigação de campo.....	117
5.1.2.1 - Levantamento topográfico por meio da tecnologia LiDAR.....	117
5.1.2.2 - Investigação a trado manual e a percussão (SPT).....	120
5.1.2.3 - Permeâmetro de Guelph.....	122
5.1.2.4 - Amostragem.....	125
5.1.3 - Ensaios de laboratório.....	126
5.1.3.1 - Ensaios de Caracterização Física.....	126
5.1.3.2 - Curva Característica do Solo.....	129
5.1.3.3 - Ensaio Edométrico.....	135

5.1.3.4 - Cisalhamento Direto.....	136
5.1.4 - Plataforma geotécnica de coleta de dados – PCD Geotécnica....	138
5.2 - ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE REGIONAL A DESLIZAMENTOS RASOS.....	141
5.3 - SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	149
6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	151
6.1 - INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO.....	151
6.1.1 - Sondagens a trado manual e SPT.....	151
6.1.1.1 - Sondagem de simples reconhecimento com trado manual.....	151
6.1.1.2 - Sondagem de simples reconhecimento (SPT).....	153
6.1.2 - Permeâmetro de Guelph.....	155
6.2 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	158
6.2.1 - Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS.....	158
6.2.2 - Curva Característica.....	162
6.2.3 - Ensaio edométrico duplo.....	174
6.2.3.1 - Avaliação da colapsibilidade dos solos através dos ensaios edométricos duplos.....	176
6.2.4 - Ensaio de cisalhamento direto.....	178
6.3 - ANÁLISE DE DA VARIAÇÃO DE UMIDADE POR MEIO DAS PCDs GEOTÉCNICAS.....	183
6.4 - SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	189
7 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS.	191
7.1 - INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E HIDROLÓGICOS UTILIZADOS.....	191
7.1.1 - Definição dos cenários das análises de suscetibilidade.....	193
7.1.1.1 - Dados de entrada do Cenário A.....	193
7.1.1.2 - Dados de entrada do Cenário B.....	196
7.2 - RESULTADOS DO CENÁRIO A.....	201
7.2.1.1 - Análises SAT do Cenário A.....	201
7.2.1.2 - Análises NSAT do Cenário A.....	217
7.2.1.3 - Comparação dos resultados do Cenário A.....	232
7.3 - RESULTADOS DO CENÁRIO B.....	234
7.3.1.1 - Análises SAT do Cenário B.....	234
7.3.1.2 - Análises NSAT do Cenário B.....	250
7.3.1.3 - Comparação dos resultados do Cenário B.....	265

7.4 -	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	267
8 -	CONCLUSÕES.....	269
	REFERÊNCIAS.....	274
	APÊNDICE A - GRANULOMETRIA, LIMITES DE ATTERBERG E CLASSIFICAÇÃO SUCS DAS AMOSTRAS COLETADAS POR MEIO DO TRADO.....	291
	ANEXO A – SONDAGENS SPT DE ESTUDOS ANTERIORES.....	294
	ANEXO B – CURVA CARACTERÍSTICA ESTUDOS ANTERIORES.....	296

1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo tem o objetivo de apresentar a importância dessa dissertação, os objetivos gerais e específicos, além da estrutura da mesma.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os taludes são definidos como superfícies inclinadas, compostos por maciços terrosos e/ou rochosos, originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos (GERSCOVICH, 2016). Devido à dinâmica natural da superfície terrestre os taludes, estão sujeitos a diversos processos de instabilização. Dentre esses fenômenos, destacam-se os movimentos gravitacionais de massa, devido à frequência e aos danos que podem causar (AUGUSTO FILHO; VIRGILI; DILÁSCIO, 2018).

Os movimentos gravitacionais de massa são definidos como o deslocamento descendente de massas de rochas, detritos, solo, material orgânico entre outros tipos de materiais induzidos pela ação da gravidade (BROMHEAD, 1992; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008). A causa primária dos movimentos gravitacionais de massa é a tendência natural à peneplanização da superfície terrestre, por causa, principalmente, da componente gravitacional atuante nos taludes que tende a mover os solos para baixo, bastando apenas uma chuva atípica ou a interferência antrópica para desencadeá-los (DAS 2007; MASSAD, 2010). Portanto, conclui-se que estes são perigosos e podem afetar a vida e propriedades humanas, tornando-se o foco de preocupação para engenheiros geotécnicos e engenheiros geológicos (BROMHEAD, 1992).

Os movimentos gravitacionais de massa são fenômenos de natureza complexa e estão entre os riscos naturais mais caros em termos de perda de vida humana e econômica (LU; GODT, 2013). Segundo Mizutori e Guha-Sapir (2017), entre 1998-2017, os deslizamentos de terra afetaram cerca de 4,8 milhões de pessoas e causaram mais de 18.000 mortes. Espera-se que as mudanças climáticas e o aumento das temperaturas ampliem o número de ocorrências. Além disso, a expansão da urbanização em áreas declivosas, que acontece, na maioria das vezes, de forma irregular, sem acompanhamento técnico adequado, acentua o processo de modificações das encostas, com a realização de cortes, desmatamentos, introdução

de cargas e etc., elevando a suscetibilidade dessas áreas aos movimentos gravitacionais de massa.

Nacionalmente, os deslizamentos de terra são um dos perigos mais frequentes, resultando em perdas econômicas e sociais significativas, como por exemplo, mortes, ferimentos e destruição de propriedades (DIAS; HÖLBLING; GROHMANN, 2021). No Brasil, eles ocorrem sob a influência de condicionantes naturais, antrópicos ou ambos (BRASIL, 2007). A chuva atua como o principal agente não-antrópico na deflagração desse fenômeno, pois está relacionada com a dinâmica das águas de superfície e subsuperfície, causando erosão, aumento das solicitações ou reduzindo a resistência do solo (AUGUSTO FILHO; VIRGILI; DILÁSCIO, 2018).

A Região Metropolitana do Recife (RMR), área de interesse dessa dissertação, apresenta um vasto histórico com inúmeros casos de movimentos de massa ao longo dos anos. Segundo Bandeira e Coutinho (2015), na RMR entre 1984 e 2012 os deslizamentos de terra causaram um total de 214 mortes. Coutinho e Bandeira (2012), acrescentam que o crescimento urbano desordenado nessa região, em conjunto com ações antrópicas, devido a ocupações precárias, associadas a precipitações intensas, aceleram a ocorrência de movimentos de massa, agravando a situação de risco dessa região.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em conjunto com Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) estimaram o contingente populacional do Brasil exposto e vulnerável ao risco de desastres naturais (inundações, enxurradas e movimentos de massa). O estudo mostrou que Recife possui o segundo maior contingente populacional da Região Nordeste vivendo em áreas de risco, com 206.761 habitantes, seguido de Jaboatão dos Guararapes com 188.026 habitantes (IBGE, 2018).

No período chuvoso de 2019, especificadamente entre os meses de junho e julho, foram contabilizados 20 óbitos na RMR em decorrência de deslizamentos (CHUVA..., 2019). Muitas famílias que residiam em áreas de risco tiveram suas casas atingidas pelo material deslizado, gerando, conseqüentemente, um grande número de feridos e desalojados. Nesse contexto, surge a importância de estudos mais aprofundados a respeito da análise de suscetibilidade a deslizamentos das áreas afetadas.

A suscetibilidade indica a potencialidade de desenvolvimento de um fenômeno ou um processo do meio físico, sejam eles naturais ou induzidos pela ação antrópica, em uma determinada área (BRASIL, 2007; BITAR, 2014). Segundo Brasil (2012), deve-se “promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência”. A carta de suscetibilidade, resultado da análise de suscetibilidade, destina-se para os trabalhos de uso e ocupação do solo, sendo um instrumento valioso para a tomada de decisão de órgãos públicos.

Desse modo, essa dissertação se propõe a realizar análises de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais em uma bacia hidrográfica que abrange áreas dos municípios de Recife-PE e Jaboatão dos Guararapes-PE. Para isso, será utilizado o método determinístico que é essencialmente quantitativo e sustentados por leis físicas, especificadamente o “Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability”, TRIGRS. Os resultados gerados pelo modelo serão validados por meio da metodologia L_R - Landslide Ratio of each FS Class – traduzido como taxa de deslizamento para cada classe de FS, desenvolvida por Park, Nikhil e Lee (2013) e representa a relação entre a porcentagem de deslizamentos dentro de uma classe específica do Fator de Segurança (FS) em comparação com o registro de ocorrência de deslizamentos.

Esta pesquisa está inserida no Projeto REAGEO - Reabilitação do Sistema Encosta-Planície, implantado na sua segunda versão em 2018 (por 05 anos) através do programa do MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, fortalecedor da viabilidade deste estudo por meio do INCT - Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia, que é formado por grupos de pesquisa por excelência da Coppe/UFRJ, Instituto de Geociências - Igeo/UFRJ, PUC-Rio, UERJ, UFPE, UFRGS e UNB, com atuação abrangente em geotecnia de encostas e planícies, propriedades de solos e rochas, geologia, geomorfologia e hidrologia. A UFPE é representada pelo grupo de pesquisa GEGEP - Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres, liderado pelo Professor Dr. Roberto Quental Coutinho, que é motivador de vários estudos relacionados a movimentos gravitacionais e de transporte de massa no Nordeste.

As pesquisas realizadas por este grupo em áreas suscetíveis a movimentos de massa contribuem para o entendimento desses fenômenos, fortalecendo, assim, a

ciência e a engenharia geotécnica brasileira. Desse modo, espera-se que esse estudo proporcione a associação entre o meio científico e social e sirva como ferramenta no monitoramento e gerenciamento dos setores suscetíveis a deslizamentos da área de estudo.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo geral dessa dissertação é determinar a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos rasos de uma bacia hidrográfica na Formação Barreiras, situada na Região Metropolitana do Recife (RMR), através da aplicação de um modelo matemático de base física. Diante do exposto os objetivos específicos são:

- Caracterizar geotecnicamente os solos da área de estudo de forma espacial. Sendo os dados obtidos por meio de ensaios campo, laboratório e coleta de resultados de estudos prévios;
- Elaborar um registro dos deslizamentos ocorridos no período de 2014 a 2020, com base nos dados fornecidos pela Defesa Civil dos municípios interceptados pela área de estudo;
- Desenvolver mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos na área de estudo a partir de um modelo matemático considerando a condição inicial saturada e não saturada.
- Analisar o desempenho do modelo utilizado com base na localização dos deslizamentos ocorridas na área de estudo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por Oito Capítulos. O capítulo atual, tem o objetivo de apresentar os motivos e a justificativa dessa pesquisa, além dos objetivos gerais e específicos e a estrutura da dissertação.

O Segundo Capítulo apresenta de forma sumária os principais conceitos acerca dos movimentos de massa e detalhada a classificação proposta de Hungr, Leroueil e Picarelli (2014). Também são abordados os principais tópicos que envolvem a análise de estabilidade de taludes e a determinação da suscetibilidade através de métodos determinísticos.

O Capítulo 3 apresenta o modelo matemático utilizado nessa dissertação, denominado como “Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-

Stability”, TRIGRS. Será exposto: a base teórica do modelo; os dados de entrada e saída, além da metodologia utilizada para validar os resultados.

O Capítulo 4 visa caracterizar a área de estudo, mostrando e discutindo a localização, a área de abrangência, aspectos climáticos, aspectos geológicos e geomorfológicos entre outros. Também serão apresentados os números e a localização dos deslizamentos ocorridos entre os anos de 2014 e 2020.

O Capítulo 5 se encontra dividido conceitualmente em duas partes. A primeira expõe as metodologias utilizadas na investigação geológica-geotécnica. A segunda parte apresentar a metodologia aplicadas no desenvolvimento das análises de suscetibilidade.

O Capítulo 6 apresenta e analisa os resultados da caracterização geológica-geotécnica realizada e está dividido em três seções principais: i) os resultados da investigação geotécnica realizada em campo; ii) os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório; e iii) os resultados da plataforma geotécnica de coleta de dados instaladas na área de estudo.

O Capítulo 7 apresenta e discute os resultados obtidos nas análises de suscetibilidade. O último capítulo expõe as conclusões obtidas, em seguida é mostrado as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento dessa dissertação, assim como os anexos e apêndices pertinentes.

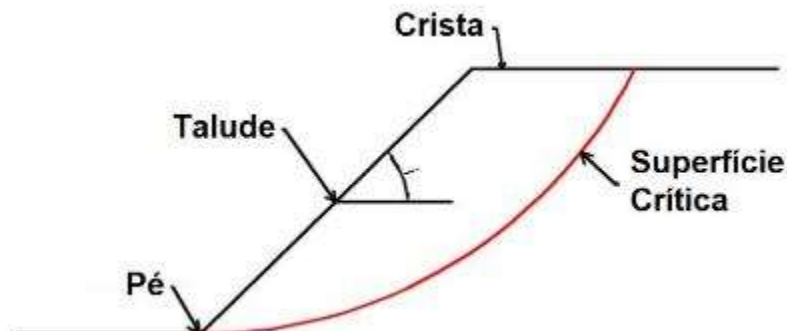
2 MOVIMENTOS DE MASSA E ANÁLISE DE SUSTEBILIDADE REGIONAL A DESLIZAMENTOS RASOS

O objetivo desse capítulo é apresentar de forma sucinta os principais conceitos acerca dos movimentos de massa, partido da definição do que é um talude até a apresentação de um sistema de classificação de movimentos gravitacionais de massa. Dada a importância do tema, também será tratado os principais conceitos que envolvem a análise de estabilidade de taludes. Em conclusão, será abordado as principais concepções que envolve a determinação da suscetibilidade através de métodos determinísticos; também será apresentado os principais modelos baseados nessa abordagem e quais são os mais utilizados em cenário nacional.

2.1 TIPOS DE TALUDE

Talude é a designação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha (GERSCOVICH, 2016). Conforme o apresentado na Figura 1, um talude é composto por: pé, talude (inclinação), crista e superfície crítica.

Figura 1 - Composição de um talude.

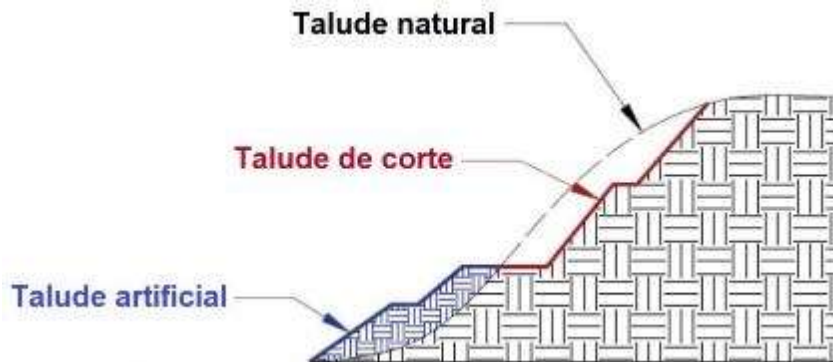


Fonte: Adaptado de Dyminski (2000).

Segundo Augusto Filho, Virgílio e Dilásio (2018) os taludes podem ser classificados em três tipos: taludes naturais ou encostas, talude de corte e talude artificial. Os mesmos estão ilustrados na Figura 2.

Os taludes naturais são definidos como superfícies inclinadas, compostas por maciços terrosos e/ou rochosos, originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos. Atualmente, devido a expansão da urbanização em áreas declivosas, as encostas podem apresentar modificações antrópicas tais como cortes, desmatamentos, introdução de cargas etc.

Figura 2 - Tipos de talude.



Fonte: Adaptado de Santos (2018).

Os taludes de corte são aqueles originado de escavações antrópicas diversas. O talude artificial, por sua vez, refere-se ao declive de aterros construídos a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens, incluído rejeitos industriais, urbanos ou de mineração.

Devido a dinâmica natural da superfície terrestre os taludes estão sujeitos a diversos processos de instabilização, tais como deslizamentos, quedas, rastejo, erosões e recalques. Dentre esses fenômenos, destaca-se os movimentos gravitacionais de massa, devido a frequência e aos danos que podem causar (AUGUSTO FILHO; VIRGILI; DILÁSCIO, 2018).

A causa primária dos movimentos gravitacionais de massa é a tendência natural à peneplanização da superfície terrestre, devido principalmente a componente gravitacional atuante nos taludes que tende a mover os solos para baixo, bastando apenas uma chuva atípica ou a interferência antrópica sem critérios técnicos para tornar a força motriz igual ou superior a resistência ao cisalhamento do solo, atendendo assim, as condições necessárias para deflagrar o deslocamento de materiais (DAS 2007; MASSAD, 2010).

2.2 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA E SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa são definidos como o deslocamento descendente de massas de rochas, detritos, solo, material orgânico entre outros tipos de materiais induzidos pela ação da gravidade. Dessa maneira, o termo movimento gravitacional de massa abrange uma ampla gama de movimentos, tais como os deslizamentos de terra, quedas, tombamentos entre outros. Esses movimentos

ocorrem quando as forças atuantes no talude, como a ação da gravidade em conjunto com outros fatores como poropressão, terremotos e etc., agindo sobre os taludes superam a resistência ao cisalhamento de seus materiais (BROMHEAD, 1992; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Segundo Goudie (2004), o impulso para a ocorrência do movimento de massa decorre da energia potencial do material em virtude de sua elevação e inclinação acima da superfície. Nesse cenário, a água pode ser um fator condicionante ou desencadeante, mas é o equilíbrio das tensões mecânicas dentro do maciço de solo ou rocha que determina se a ruptura ocorre ou não. Nos movimentos gravitacionais de massa, ao contrário do que acontece no transporte de massa (erosão), ocorre a formação de uma superfície de ruptura. A superfície de ruptura é definida como o limite formado após o deslizamento entre a massa deslizada e o solo não perturbado ao redor e abaixo do deslizamento (LU; GODT, 2013).

Diante do exposto, constata-se que os movimentos gravitacionais de massa se trata de um fenômeno de natureza complexa, exigindo a conciliação de diversas áreas do conhecimento como a engenharia, geologia e a geomorfologia para sua completa compreensão. Devido a multiplicidade inerente aos geomateriais e os movimentos de massa, diversos autores desenvolveram sistemas de classificações para esses fenômenos. O principal objetivo dessas classificações é unificar a linguagem técnica e facilitar o intercâmbio de informações entre os pesquisadores da área.

Segundo Li e Mo (2019) um grande número de sistemas de classificação de deslizamentos de terra vem surgindo desde meados do século XIX, destacando no cenário internacional as seguintes propostas: Baltzer (1875), Howe (1909), Sharpe (1938), Varnes (1958, 1978), Hutchinson (1968), Cruden e Varnes (1996), Hungr, Leroueil e Picarelli (2014). Desses sistemas de classificação, o sistema proposto por Varnes (1978) ganhou aceitação mundial, como visto em IAEG (1990), EPOCH (1993), WP/WLI (1993a, 1993b) e Highland e Bobrowsky (2008). Nas últimas décadas, a proposta de Varnes (1978), recebeu atualizações como o visto em Cruden e Varnes (1996) e Hungr, Leroueil e Picarelli (2014), sendo esse último o sistema de classificação adotado nessa dissertação.

Além das propostas internacionais, também foram criados sistemas de classificação para ambientes tropicais, tendo como exemplo, Vargas (1985), Nunes (1969) e Augusto Filho (1992). Esse último, revisou e adaptou a proposta de

classificação de Varnes (1978), ajustando as características dos principais grandes grupos de processos de deslizamentos à dinâmica ambiental brasileira (GERSCOVICH, 2016).

De forma geral, segundo o GEO-RIO (2014), os sistemas de classificação modernos são formulados se baseando nos seguintes critérios: a) Cinética do movimento: definida pela velocidade, direção e sequência dos deslocamentos; b) Tipo do material: solo, rocha, detritos, depósitos etc; c) Geometria - extensão e formato da superfície de ruptura; d) Tipos de movimento.

2.3 CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA POR HUNGR, LEROUUEIL E PICARELLI (2014)

A proposta feita por Hungr, Leroueil e Picarelli (2014), trata-se de uma atualização das classificações de Varnes (1978), considerando também os conceitos introduzidos por Cruden e Varnes (1996).

Essa atualização modificou vários aspectos da classificação de Varnes (1978), sendo a principal delas a expansão do número de materiais considerados, substituindo assim, a divisão tríptica de materiais da classificação original, ou seja, rochas, detritos e terra por um número maior de materiais, abrangendo rocha, argila, lama, areia, cascalho, rochas, detritos, turfa e gelo, buscando, assim, compatibilizar a terminologia geológica e geotécnica, ou seja, unificar a origem dos materiais com suas propriedades mecânicas.

Ao todo a classificação de Hungr, Leroueil e Picarelli (2014) apresenta 32 tipos de movimentos de massa, ao contrário dos 29 tipos definidos por Varnes (1978). Nessa nova classificação cada um dos movimentos é respaldado por uma definição formal. Além disso, esse sistema também permite denominar movimentos de terra complexos, através da combinação de dois ou mais nomes de tipos de movimentos de massa.

A Tabela 1 apresenta a sumarização do sistema de classificação alterado por Hungr, Leroueil e Picarelli (2014). Nela, as colunas representam o tipo de material e as linhas o tipo de movimento.

Tabela 1 - Sistema de classificação de movimentos de massa proposto por Varnes (1978), adaptado por Hungr, Leroueil e Picarelli (2014).

Tipo de Movimento	Rocha	Solo
Queda	1. Queda de rocha / gelo	2. Queda de pedregulhos / detritos / silte
Tombamento	3. Tombamento de bloco de rocha 4. Tombamento flexural de rocha	5. Tombamento de cascalho / areia / silte
Deslizamento	6. Deslizamento rotacional de rocha 7. Deslizamento planar de rocha 8. Deslizamento em cunha de rocha 9. Deslizamento composto de rocha 10. Deslizamento irregular de rocha	11. Deslizamento rotacional de argila / silte 12. Deslizamento planar de argila / silte 13. Deslizamento de cascalho / areia / detritos 14. Deslizamento composto de argila / silte
Expansões laterais	15. Expansões em taludes rochosos	16. Liquefação de areia / silte 17. Expansões laterais de argilas sensíveis
Fluxo	18. Avalanche de rocha / gelo	19. Fluxo de areia / silte/ detritos secos 20. Fluxo de areia / silte / detritos 21. Fluxo de argilas sensíveis 22. Fluxo de detritos 23. Fluxo de lama 24. Inundação de detritos 25. Avalanche de detritos 26. Fluxo de terra 27. Fluxo de turfa

Deformação no talude	28. Deformação de talude montanhoso 29. Deformação de talude rochoso	30. Deformação de talude de solo 31. Creep (rastejo) de solo 32. Solifluxão
-------------------------	---	---

Fonte: Hungr, Leroueil e Picarelli (2014).

2.3.1 Quedas

De acordo com Hungr, Leroueil e Picarelli (2014), este movimento é definido como desprendimento, queda, rolamento e salto de fragmentos de rocha, gelo ou solo, podendo ocorrer de forma isolada ou aglomerada. O movimento ocorre com grande interação entre os fragmentos em movimento e a superfície. Observa-se, porém, que os blocos de materiais mais frágeis como solo e gelo, podem quebrar durante os impactos causados pelo movimento. De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), esses fragmentos descem encosta abaixo com velocidades muito altas, podendo atingir grandes distâncias e, assim, danificar estruturas e ferir pessoas. A Figura 3 apresenta uma representação de quedas de rocha.

Figura 3 – Queda.



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

As quedas são desencadeadas pelos seguintes mecanismos: ação alternada de congelamento e degelo ao longo de fraturas e juntas; por ciclagem térmica em massas rochosas; por perda de apoio de blocos causada pela ação erosiva; por processo de desconfinamento lateral de maciços rochosos; por alívio de tensões de origem tectônica; por vibrações; por empuxo hidrostático ao longo de juntas verticais ou pela junção desses processos (NIEBLE; GUIDICINI, 1984).

2.3.2 Tombamentos

Esse movimento é definido como rotação para frente e consecutivo tombamento de colunas de rocha, placas de rocha e colunas de solo coesivo (HUNGR; LEROUÉIL; PICARELLI, 2014). A rotação ocorre em torno de um ponto, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. O movimento geralmente começa lento, mas o último estágio da ruptura é caracterizado por velocidades altas, sendo, portanto, muito destrutivo. A Figura 4 exemplifica movimentos de massa do tipo tombamento.

Figura 4 – Tombamento.



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

Os tombamentos são impulsionados principalmente pela ação da gravidade sobre a massa deslocada e/ou pela água ou gelo nas discontinuidades no interior da massa e também por vibrações e condições climáticas diferenciadas (CRUDEN; VARNES, 1996; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

2.3.3 Deslizamentos

Os deslizamentos são movimentos rápidos que ocorre em solos e rochas, apresentando uma superfície de ruptura bem definida (NIEBLE; GUIDICINI, 1984). A ruptura se dá pela superfície que apresenta a menor resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2016). Ressalta-se que o movimento ocorre de forma progressiva, apresentando sinais de movimentação como fissuras e degraus de abatimento na superfície do solo (CRUDEN; VARNES, 1996).

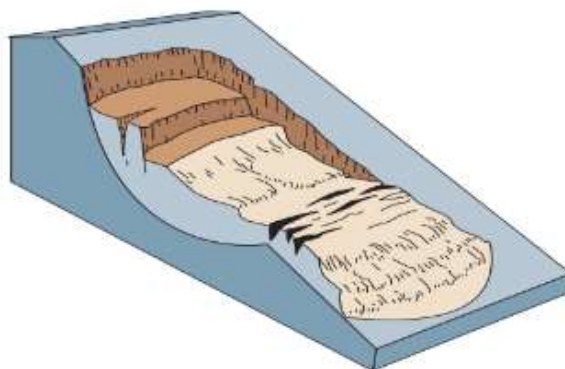
Os deslizamentos são classificados de acordo com a forma da superfície de ruptura em três tipos distintos, planares ou rasos, circulares ou em cunha. Destaca-se que os deslizamentos é o tipo de movimento que ocorre com maior frequência no Estado de Pernambuco.

2.3.3.1 Deslizamentos rotacionais

Os deslizamentos rotacionais são movimentos de massa gravitacionais que apresentam superfície de ruptura de forma cilíndrica ou curva, sendo frequente em taludes compostos por materiais homogêneos. Nos deslizamentos rotacionais a massa rompida move-se ao longo da superfície de ruptura apresentando pouca deformação interna. Apresentam velocidade de deslocamento lenta ou moderadamente lenta em taludes rochosos, enquanto que em taludes terrosos a

velocidade pode variar de lenta a rápida (HUNGR; LEROUEIL; PICARELLI, 2014). A Figura 5 ilustra um deslizamento rotacional.

Figura 5 – Deslizamento rotacional.



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

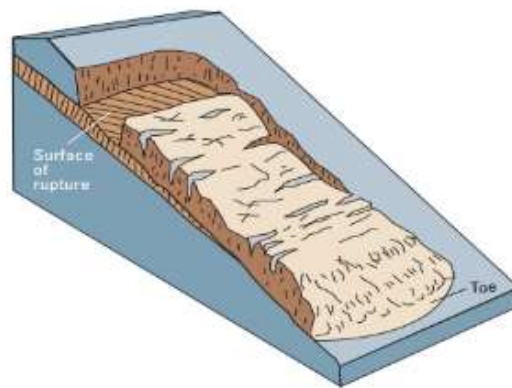
Devido a homogeneidade dos materiais que o compõe, os deslizamentos rotacionais ocorrem com mais frequência em aterros artificiais (CRUDEN; VARNES, 1996). De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), os deslizamentos rotacionais podem danificar estruturas, rodovias e redes de abastecimento.

2.3.3.2 Deslizamentos planares

Os deslizamentos planares ou rasos são movimentos de massa gravitacionais com superfície de ruptura plana. São geralmente controlados pelas discontinuidades geológicas ou pelas superfícies de contato entre rochas e solos residuais ou transportados (CRUDEN; VARNES, 1996). De modo sumário, geralmente esse movimento ocorre no contato entre materiais com diferentes características de resistência e permeabilidade. Este é o tipo de deslizamento mais evidente na área de estudo dessa dissertação, conforme o apresentando no item 4.2.

Em taludes terrosos o bloco de solo coeso desliza em uma superfície de ruptura planar inclinada. A separação da massa deslocada do talude ocorre através de trincas profundas, além disso a velocidade desse movimento varia de lenta a rápida. A Figura 6 ilustra um deslizamento planar.

Figura 6 – Deslizamento planar.



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

A massa de um deslizamento planar desloca-se para fora, ou para baixo e para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana. A profundidade da superfície de ruptura de um deslizamento planar é geralmente mais rasa que as dos deslizamentos rotacionais. Outra diferença, refere-se a distância percorrida pela massa deslocada, enquanto que em deslizamentos rotacionais a massa deslocada tende a restaurar o equilíbrio durante o movimento, em deslizamentos planares a massa desprendida pode atingir distâncias consideráveis se a superfície da ruptura for muito inclinada (CRUDEN; VARNES, 1996; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

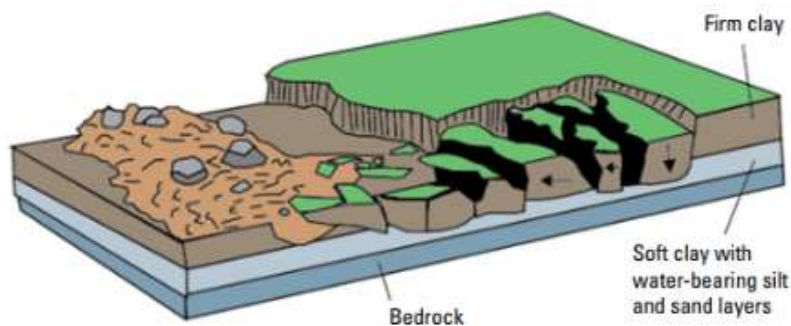
2.3.3.3 Deslizamentos em cunha

Movimento de massa mais recorrente em talude rochosos, são caracterizados por serem movimentos extremamente rápidos, geralmente de pequena escala, sendo sua superfície de ruptura formada pela interseção de dois planos de fraqueza que se cruzam e são orientados para baixo. Durante o movimento, a massa deslocada não apresenta deformação e interna (HUNGR; LEROUEIL; PICARELLI, 2014).

2.3.4 Expansões laterais

As expansões laterais são definidas como fraturamento, divisão e deslocamento de uma camada de rocha ou solo coeso em taludes de baixa inclinação ou em terrenos planos, devido a deformação intensiva de uma camada subjacente de material menos resistente. Em taludes rochosos os movimentos ocorrem de forma bastante lenta. Em taludes terrosos os movimentos são extremamente rápidos e atua fazendo que os blocos de solo flutuem sob uma camada de solo liquefeita por terremotos ou liquefação espontânea. A Figura 7 ilustra os movimentos de massa do tipo expansão lateral.

Figura 7 – Expansão lateral.

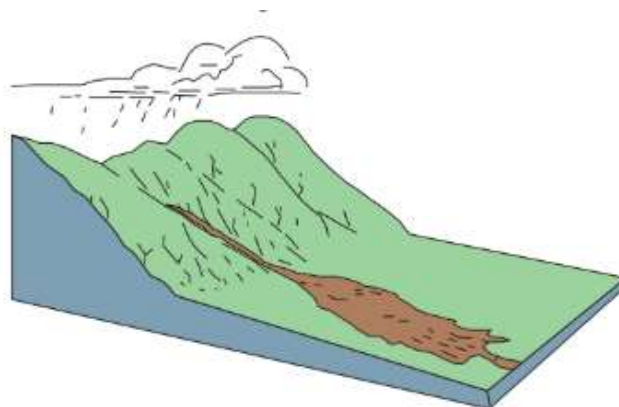


Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

2.3.5 Fluxos

São movimentos de massa extremamente rápidos, sem uma superfície de ruptura definida, em que um grande volume de material heterogêneo escoou encosta abaixo. A massa deslocada comportando-se como um fluido viscoso, sendo intensamente deformada, devido à perda completa de suas características. Ocorrem geralmente devido excesso de poropressão ou liquefação do material. A liquidação ocorre devido: i) adição de água em solos arenosos; ii) esforços dinâmicos e; iii) amolgamento de argilas sensíveis. Segundo Highland e Bobrowsky (2008), os fluxos possuem grande potencial destrutivo, pois podem alcançar grandes distâncias sem qualquer tipo de alerta. A Figura 8 apresenta uma representação do fluxo de detritos.

Figura 8 – Fluxo de detritos.



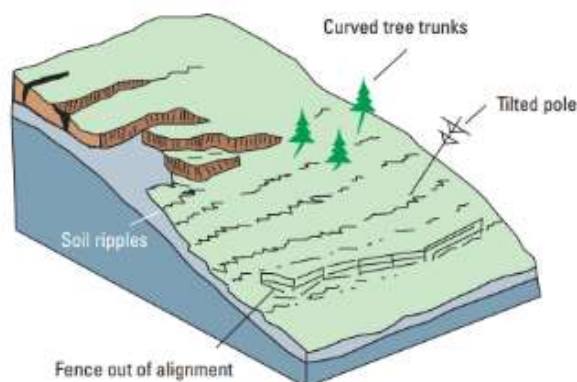
Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

2.3.6 Deformação de taludes

Trata-se da deformação gravitacional profunda de taludes rochosos e terrosos íngremes e altos. Esses movimentos ocorrem sob níveis de tensão efetiva variável, desenvolvendo escarpas, bancos, rachaduras, valas e protuberâncias, sem uma

superfície de ruptura bem definida e com taxas de movimento extremamente lenta e variável. A Figura 9 apresenta uma ilustração do movimento de massa do tipo rastejo.

Figura 9 – Rastejo (“creep”).



Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

Nessa categoria, também estão inclusos os rastejos (“creep”), caracterizados por serem movimentos extremamente lento das camadas superficiais do solo, devido a variação de temperatura e umidade (HUNGR; LEROUÉIL; PICARELLI, 2014). Ocorrem em um estado de tensão, inferior ao cisalhamento e são identificados pela observação do deslocamento do eixo de estrada, mudanças na verticalidade de árvores e postes; embarrigamento de muros e surgimento de pequenos abatimentos ou degraus na encosta (GERSCOVICH, 2016). Podem afetar grandes áreas danificando tubulações, fundações de pilares de pontes, viadutos e etc.

2.4 CAUSAS E CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa ocorrem sob a influência de condicionantes naturais, antrópicos ou ambos (BRASIL, 2007). No Brasil as chuvas atuam como o principal agente não-antrópico na deflagração de escorregamentos, já que está diretamente relacionada com a dinâmica das águas de superfície e subsuperfície, causando erosão, aumento das solicitações ou reduzindo a resistência do solo (AUGUSTO FILHO; VIRGILI; DILÁSCIO, 2018). A Tabela 2 sintetiza os principais condicionantes dos movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.

Tabela 2 - Principais condicionantes dos movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.

Condicionantes
• Climáticos, com destaque para o regime pluviométrico;

-
- Materiais que compõem o substrato das encostas/taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistosidade, fraturas, etc.), suas características e distribuição espacial;
 - Geomorfológicos, com destaque para inclinação, amplitude e forma do perfil dos taludes e das encostas (retilíneo, convexo e côncavo);
 - Regime das águas de superfície e subsuperfície;
 - Características do uso e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e servida etc.
-

Fonte: Augusto Filho, Virgili e Dilásccio (2018).

Vallejo et al. (2002) divide os processos que levam a ocorrência de deslizamentos de terra em fatores condicionantes (passivos) e desencadeantes (ativos), conforme o apresentado na Tabela 3. Os fatores condicionantes abrangem fatores geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos, ou seja, referem-se as características intrínsecas do solo. Os fatores desencadeantes são aqueles que provocam a ruptura, uma vez que se cumprem uma série de condições e atuam de forma externa ao talude, modificando suas características, propriedades e condições de equilíbrio.

Tabela 3 - Fatores influentes na estabilidade de taludes.

Fatores Condicionantes	Fatores Desencadeantes
- Estratigrafia e litologia (alternância de materiais de diferentes propriedades e origens); - Estrutura geológica (distribuição espacial das descontinuidades); - Condicionantes hidrogeológicas e comportamento hidrogeológico dos materiais (geração de poropressão; aumento do peso devido saturação; erosão; intemperismo) - Propriedades físicas, resistentes e deformacionais (resistência ao cisalhamento do solo e propriedades resistentes das descontinuidades de taludes rochosos); - Tensões naturais e estado tenso-deformacional.	- Sobrecargas estáticas (peso de estruturas); - Sobrecargas dinâmicas (sismos); - Mudança nas condições hidrogeológicas; - Fatores climáticos (modificação do conteúdo de água no solo); - Variações na geometria (escavações); - Redução nos parâmetros de resistência.

Fonte: Adaptado de Vallejo et al. (2002).

Cruden e Varnes (1996), separa as causas dos movimentos de movimentos de massa em quatro grupos (geológicos, morfológicos, físicos e antrópicos), conforme o apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Lista das causas dos deslizamentos de terra.

Causas Geológicas-Geotécnicas
- Materiais frágeis, tais como algumas encostas vulcânicas ou sedimentos marinhos não consolidados; - Materiais sensíveis; - Materiais intemperizados; - Materiais cisalhados; - Materiais em diáclastos ou fissurados; - Descontinuidade de massa negativamente orientada (falhas, bandamentos, foliações, etc.); - Descontinuidade estrutural orientada em contraste (falha, inconformidade, contato etc.); - Subpressão tectônica ou vulcânica; - Contraste de permeabilidade; - Contraste de rigidez (material denso e rígido, sobre material plástico).
Causas Morfológicas
- Curvatura das vertentes; - Tipo de relevo; - Remoção da vegetação por erosão, queimadas, secas, etc.; - Erosão de margens laterais; - Erosão fluvial no pé do talude, erosão de onda/glacial no pé do talude; - Erosão subterrânea ("pipping").
Causas Físicas
- Chuvas intensas; - Derretimento rápido de neve; - Precipitação excepcional prolongada; - Rebaixamento rápido de inundações e marés; - Terremoto e erupção vulcânica; - Intemperismo/desgaste devido ao congelamento e descongelamento; - Intemperismo/desgaste devido a contração e expansão de solos expansivos.
Causas Antrópicas
- Escavação no talude ou na sua base (cortes); - Carregamento do talude ou da sua crista (aterros); - Rebaixamento de reservatórios;

-
- Desmatamento;
 - Irrigação e mineração;
 - Vibração artificial;
 - Vazamento de águas servidas ou de abastecimento.
-

Fonte: Cruden e Varnes (1996).

2.5 ESTABILIDADE DE TALUDES

O objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de deslizamentos em encostas e taludes construídos (GERSCOVICH, 2016). A abordagem das análises de estabilidade pode ser determinística, desprezando a variabilidade natural dos parâmetros ou probabilística, introduzindo no processo as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos utilizados (GEO-RIO, 2014). A análise de estabilidade também pode ser realizada através de dois métodos de cálculo distintos, o Método do Equilíbrio Limite e o Método de Análise de Tensões (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

O Método do Equilíbrio Limite é geralmente usado para avaliar a estabilidade do talude, requerendo apenas informações acerca da resistência do solo. Nesse método, considera-se que o solo é um material rígido e perfeitamente plástico, devido a isso, comporta-se como um corpo rígido que pode escorregar sobre uma superfície de geometria conhecida sob efeito da gravidade (GEO-RIO, 2014).

O Método da Análise de Tensões é usado para estimar as deformações do talude, se baseando no método dos elementos finitos ou das diferenças finitas, sendo necessário para a sua aplicação o conhecimento dos parâmetros de resistência do solo, além da compreensão do comportamento tensão-deformação do mesmo.

Na prática corrente da geotecnia, a estabilidade de talude é definida usualmente em termos determinísticos, por meio do cálculo do Fator de Segurança (FS), aplicando o Método do Equilíbrio Limite, em virtude de sua simplicidade e precisão. O Fator de Segurança (FS) é uma grandeza adimensional que expressa a razão entre a resistência ao cisalhamento do solo (s) e a tensão de cisalhamento mobilizada na superfície crítica hipotética (τ), conforme o apresentado na Equação (1).

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

Nesse caso, s é a envoltória de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb, apresentada na Equação (2), que pode ser expressa em termos de tensão total ou efetiva.

$$s = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

Em que c é equivalente ao intercepto de resistência, σ é a tensão normal no plano de ruptura e φ é o ângulo de atrito.

Existem diversas maneiras de formular o FS. A mais comum assume que o valor do FS é constante ao longo da superfície de deslizamento e é definida com base no equilíbrio de força ou equilíbrio de momento. O FS definido por meio do equilíbrio de momento é geralmente usado para a análise de deslizamentos rotacionais, enquanto que o FS definido com base no equilíbrio de forças é geralmente aplicado a deslizamentos translacionais ou rotacionais com superfície crítica composta (CHENG; LAU, 2014).

Através da Tabela 5 é possível classificar a condição de estabilidade do talude por meio dos resultados obtidos com o cálculo do Fator de Segurança (FS). Observa-se que a situação ideal é obter um valor de FS $\gg 1$.

Tabela 5 - Condição de estabilidade do talude em função do FS.

Fator de Segurança (FS)	Condição do talude
FS < 1,0	Talude instável; caso o talude venha a ser implantado (corte ou aterro) nestas condições, deverá sofrer ruptura.
FS = 1,0	Condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura; também condição adotada geralmente nos cálculos de retro-análise.
FS > 1,0 (pouco maior)	Condição estável; quanto mais próximo de 1,0 for o FS, mais precária e frágil será a condição de estabilidade do talude.
FS $\gg$ 1,0 (muito maior)	Condição estável; quanto maior for o FS, menores serão as possibilidades de o talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas (de percolação d'água etc.).

Fonte: Adaptado de Carvalho (1991).

Quando o FS=1,0, isto significa que as tensões cisalhantes no interior do talude se igualam a resistência ao cisalhamento do solo, por essa razão considera-se que o talude está em eminência de ruptura. Essa condição é atendida quando há aumento nas tensões de cisalhamento ou redução da resistência ao cisalhamento. Na Tabela

6, os mecanismos deflagradores estão divididos e organizados seguindo essas duas condições.

Tabela 6 - Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de massa.

Ação	Fatores	Fenômenos geológicos/antrópicos
Aumento da solicitação	Remoção de massa	- Erosão, escorregamentos; - Cortes.
	Sobrecarga	- Peso da água de chuva; - Depósito de material; - Peso da vegetação; - Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	- Terremotos, ondas, etc; - Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	- Água em trincas; congelamento, material expansivo, etc.
Redução da resistência	Características inerentes ao material	- Características geomecânicas do material, tensões iniciais.
	Mudanças ou fatores variáveis	- Redução da coesão, ângulo de atrito; - Elevação do nível d'água; - Aumento da umidade/Redução da sucção.
	Outras causas	- Enfraquecimento devido ao rastejo progressivo; - Ação das raízes das árvores e buracos de animais.

Fonte: Varnes (1978) adaptado por Coutinho e Silva (2005).

A Norma Brasileira referente a estabilidade de taludes, a ABNT NBR 11682 (2009), define os valores de FS mínimo de acordo com o grau de segurança esperado para um determinado local, considerando os danos que podem ser causados a vidas humanas, a propriedades materiais e ao meio ambiente. A Tabela 7 apresenta os FS mínimos contra o deslizamento recomendados pela norma.

Tabela 7 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Nível de segurança contra danos ambientais e materiais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

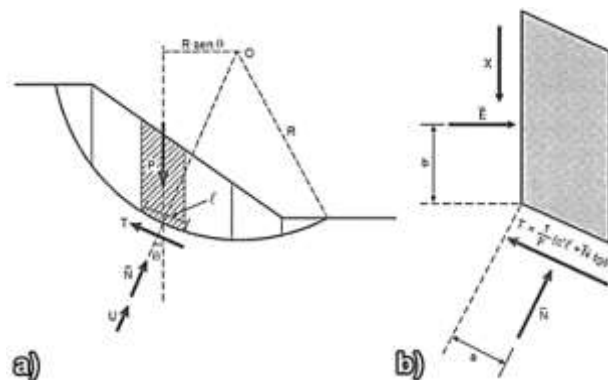
2.5.1 Métodos de análise de estabilidade de talude

O método de análise de estabilidade deve considerar as características da ruptura ocorrida ou potencial de um talude específico (GEO-RIO, 2014). Os métodos de análise de estabilidade subdividem-se de maneira bastante simplificada em método das fatias, indicado para superfície crítica aproximadamente circular ou complexa e método do talude infinito recomendado para análises em que a superfície crítica é predominantemente translacional, ou seja, paralela à superfície do talude.

2.5.1.1 Método das fatias

Nesse método é assumido algumas hipóteses simplificadoras, entre elas admite-se que a linha de ruptura seja um arco de circunferência; além disso, a massa de solo é subdividida em fatias, conforme o apresentado na Figura 10-(a). A Figura 10-(b), ilustra as forças atuantes em uma fatia genérica, como por exemplo, o peso (P) da fatia; as forças resultantes das pressões neutras (U); a resistência do solo (T); o esforço normal (N) na base da fatia; o esforço horizontal na lateral da fatia (E); e a força cisalhante (X) entre as fatias.

Figura 10 - a) Método das fatias; b) Forças na fatia genérica.



Fonte: Massad (2010).

Uma síntese das principais formulações baseadas no método das fatias é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Formulações baseadas no método das fatias.

Formulações	Características principais
Fellenius (1936)	Método simplificado. Superfície circular. Assume que a resultante das forças entre fatias é paralela à base de cada fatia, razão pela qual pode apresentar erros significativos na determinação do fator de segurança, geralmente subestimando-o. Recomenda-se utilizar métodos mais acurados.
Simplificada de Bishop (Bishop, 1955)	Apesar de ser um método simplificado tem boa acurácia. Superfície circular. Assume que a resultante das forças que atuam nas laterais das fatias é horizontal e obtém o fator de segurança através de equilíbrio de forças verticais e momentos.
Janbu (1954)	Método simplificado. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que as forças laterais são horizontais e obtém o FS através de equilíbrio de forças. Posteriormente um ábaco de correção foi introduzido para melhorar a acurácia do FS.
Morgenstern e Price (1965)	Método rigoroso. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que a inclinação das forças laterais obedece a uma função $f(x)$ prescrita. As inclinações são determinadas durante processo de cálculo para satisfazer às condições de equilíbrio de forças e momentos.
Spencer (1967)	Método rigoroso. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que a inclinação das forças laterais é a mesma para todas as fatias. A inclinação é determinada durante o processo de cálculo de modo a satisfazer às condições de equilíbrio de forças e momentos.

Fonte: GEO-RIO (2014).

Conforme apresentado na Tabela 8, as formulações para a análise de estabilidade estão classificadas como métodos rigorosos ou simplificados. Isso advém

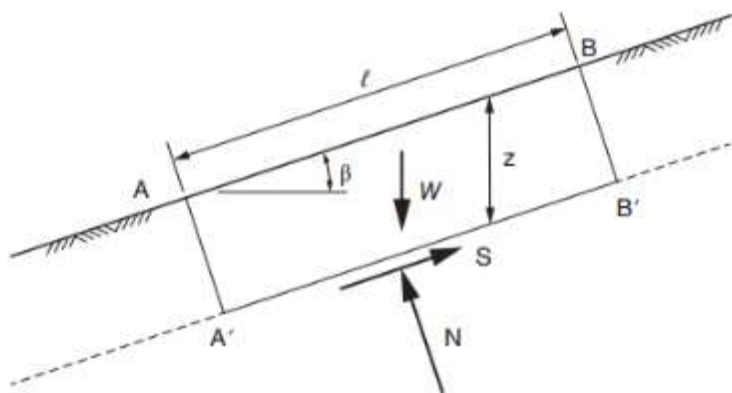
do fato que o cálculo do fator de segurança no método das fatias é estaticamente indeterminado, ou seja, o número de equações disponíveis é menor que o número de incógnitas. Desse modo, vários autores em suas formulações, assumiram hipóteses simplificadoras acerca da magnitude, inclinação e posição da resultante das tensões que atuam nas laterais das fatias. Assim, os métodos rigorosos são aqueles que atendem todas as condições de equilíbrio estático, enquanto que os métodos simplificados não.

2.5.1.2 Método do talude infinito

O método do talude infinito é utilizado para determinação do fator de segurança em deslizamentos rasos translacionais. Nessa metodologia, é assumido que o talude possui extensão infinita e que a ruptura ocorre pelo deslizamento de um bloco de solo de profundidade pequena e constante formando uma superfície de ruptura planar e paralela à superfície do terreno (COUTINHO; SILVA, 2005).

Como o talude é infinito, as tensões serão as mesmas em quaisquer dois planos perpendiculares ao talude, como os planos A – A' e B – B' na Figura 11. Nessa Figura S é a tensão cisalhante; N é a força normal; β é a inclinação do talude medido em relação a horizontal; W é o peso do bloco; l é a distância entre as duas extremidades do bloco, medida paralelamente a encosta e z é a profundidade do plano de cisalhamento, medida na vertical.

Figura 11 - Talude infinito e superfície de ruptura planar.



Fonte: Duncan, Wright e Brandon (2014).

Para um talude infinito, as forças nas duas extremidades do bloco de solo serão idênticas em magnitude, e apresentarão direções opostas e colineares. Assim, as forças nas extremidades do bloco se equilibram e por esse motivo são ignoradas nas

equações de equilíbrio. Em termos de tensão efetiva o fator de segurança é calculado através da Equação (3):

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \beta - u) \tan \varphi'}{\gamma z \cos \beta \sin \beta} \quad (3)$$

Onde c' a coesão efetiva do solo; φ' é o ângulo de atrito efetivo do solo; γ é o peso específico do solo; β é o ângulo de inclinação do talude.

2.5.2 Influência da sucção na estabilidade de taludes

A análise de estabilidade se tornou uma ferramenta analítica comum para avaliar o fator de segurança de encostas naturais e artificiais. Conforme apresentado nos itens 2.5.1.1 e 2.5.1.2, existem vários princípios e simplificações utilizadas na formulação dos métodos de análise de equilíbrio limite. Porém, de forma geral, os incrementos causados pela poropressão negativa (sucção) na resistência ao cisalhamento é frequentemente ignorado (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

A Equação (4) foi desenvolvida por Fredlund e Morgenstern (1977), para determinar a resistência de solos não saturados, considerando a influência da sucção.

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b + (\sigma - u_a) \tan \varphi' \quad (4)$$

Em que: σ é a tensão normal total; u_a é a pressão no ar; u_w é a pressão na água; c' e φ' são os parâmetros efetivos de resistência do solo saturado e; φ^b é o parâmetro que denota o ganho de resistência em decorrência do aumento da sucção.

Na engenharia geotécnica existe a percepção de que não considerar o efeito da sucção nos cálculos de análise de estabilidade é um procedimento a favor da segurança. Porém, segundo Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012), nas situações em que o lençol freático é profundo ou em locais onde há a possibilidade de deslizamentos rasos, as pressões negativas não devem ser ignoradas.

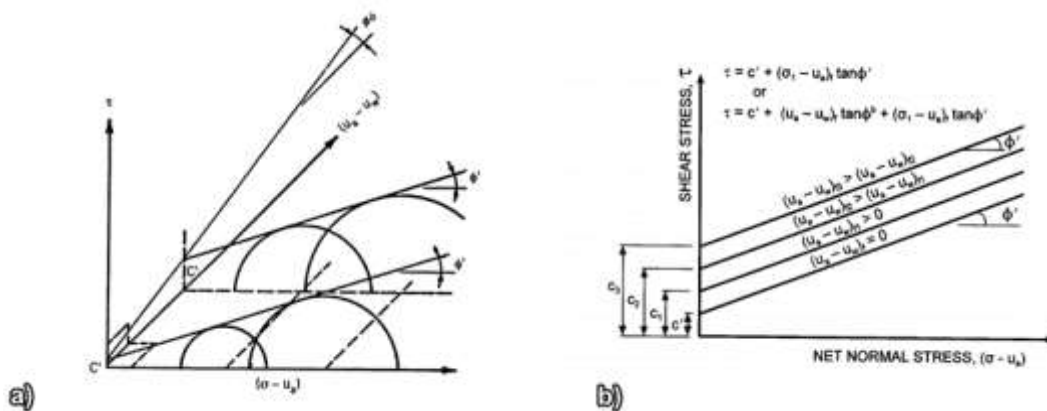
Na zona não saturada, a água dos poros é contínua ou semicontínua e a pressão da água dos poros está abaixo da pressão atmosférica (negativa), sendo a magnitude dessa poropressão controlada pela tensão superficial nos limites ar-água dentro dos poros. Em geral, quanto mais finas as partículas do solo, maior será a franja capilar e, portanto, maior será a pressão negativa dos poros (ABRAMSON et al., 2002).

De forma sucinta, a influência da sucção na estabilidade de taludes, está relacionada com o aumento das tensões efetivas dentro de uma massa de solo, aumentando assim a estabilidade de uma encosta. Entretanto, essa poropressão negativa diminui quando o grau de saturação aumenta e se torna zero quando o solo está saturado. Ho e Fredlund (1982a) sugeriram que o aumento na resistência ao cisalhamento devido à poropressão negativa pode ser expresso através da Equação (5):

$$C = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (5)$$

A envoltória de resistência ao cisalhamento de um solo não saturado pode ser representada em um gráfico tridimensional usando variáveis de tensão: tensão normal líquida ($\sigma - u_w$) e a sucção mátrica ($u_a - u_w$), como mostrado na Figura 12-a. A projeção da envoltória tridimensional no plano τ x ($u_a - u_w$), apresentada na Figura 12-b, mostra que as envoltórias interceptam o eixo da tensão cisalhante em posições crescentes como resultado do acréscimo da parcela do intercepto de coesão devido ao aumento da poropressão negativa (sucção mátrica).

Figura 12 - a) Envoltória de resistência de solos não saturados; b) Projeção horizontal no plano τ x ($u_a - u_w$) para diferentes valores de sucção.



Fonte: Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012).

2.6 DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS

O Mapeamento Geotécnico constitui um método utilizado para representar por meio de mapas e cartas informações e propriedades sobre materiais e processos geológicos (PIZZATO; GRAMANI, 2017). Sua produção é composta por uma sequência de etapas de trabalho que envolve: levantamento, caracterização, avaliação, interpretação de dados e sistematização dos mesmos. Os produtos

gerados pelo Mapeamento Geotécnico possuem as mais diversas finalidades, sendo as principais: aplicação em obras civis; planejamento territorial; determinação da suscetibilidade a algum fenômeno; de aptidão à urbanização; mapeamento de risco etc. (CANIL et al., 2018).

A suscetibilidade indica a potencialidade de desenvolvimento de um fenômeno ou um processo do meio físico, sejam eles naturais ou induzidos em uma determinada área (BRASIL, 2007; BITAR, 2014). Nesse sentido, integrando os conceitos apresentados, a carta de suscetibilidade é um tipo de carta geotécnica que, a partir da análise interpretativa de dados geológico-geotécnicos, destina-se, geralmente, para os trabalhos de uso e ocupação do solo (PFALTZGRAFF, 2007). Essencialmente, devem apresentar a localização dos processos e zonas afetadas, a representação dos fatores condicionantes e a representação das zonas susceptíveis, classificadas geralmente como baixa, média e alta suscetibilidade a um determinado processo (PIZZATO; GRAMANI, 2017).

As metodologias mais empregadas para elaboração das cartas de suscetibilidade a deslizamentos são: avaliação direta; superposição de fatores condicionantes; compartimentação baseada em unidades de relevo; combinação de fatores; métodos probabilísticos e métodos determinísticos (PIZZATO; GRAMANI, 2017). Os Métodos Determinísticos, foco dessa dissertação, são sustentados em leis físicas e integram modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos e busca diminuir a subjetividade da classificação dos graus de suscetibilidade por meio do cálculo do Fator de Segurança (LISTO, 2015). Sua aplicação envolve o estudo geológico e geotécnico de áreas propensas a deslizamentos para determinação das propriedades físicas dos materiais, devido a isso, sua aplicação é mais indicada em pequenas áreas (PFALTZGRAFF, 2007).

Atualmente, existem vários modelos capazes de produzir mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos utilizando variáveis mecânicas e físicas, como o apresentando na Tabela 9. Segundo Viet et al. (2017), diferentes pesquisas fizeram uso desses modelos visando: mapear a suscetibilidade a deslizamentos rasos de uma determinada área; avaliar a sensibilidade dos parâmetros de entrada e comparar os resultados obtidos com a distribuição espacial de deslizamentos ocorridos na área de estudos.

Tabela 9 - Modelos determinísticos para análise de suscetibilidade a deslizamentos raros.

Modelo	Descrição	Licença / Código aberto
CHASM	Modelo Hidrológico de Estabilidade	Standalone Software
LISA	Análise de Estabilidade	Composto por scripts
SHALSTAB	Modelo de estabilidade a deslizamentos rasos	jgrasstools (Java source), extensão do ArchView
SMORPH	Modelo morfológico de encostas	ESRI ArcScript
iSLAM/IDSSM	Modelo de estabilidade a deslizamentos rasos	Sem código aberto
SINMAP	Modelo de estabilidade a deslizamentos rasos através de fatores	MW-SINMAP
SHETRAN	Sistema Hidrológico Europeu	Sem código aberto
TRIGRS	Modelo de estabilidade regional a deslizamentos rasos induzidos por chuva de intensidade variável	USGS, código aberto, composto por scripts
PROBSTAB	Modelo de estabilidade incluso Pacote PCRaster GIS	Sem código aberto
PISA	Modelo probabilísticos de análise de estabilidade	PISA-m Software
SUSHI	Modelo de estabilidade a deslizamentos rasos com simulação da condição de saturação do solo	Sem código aberto
GEOtop-FS	Modelo de dispersão hidrológica acoplado com modelo probabilístico de análise de estabilidade	Sem código aberto

Fonte: Adaptado de An et al. (2018).

Dentre os modelos disponíveis os mais utilizados no meio técnico-científico são: o SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model), desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994); o SINMAP (Stability INDEX MAPPING), desenvolvido por Pack, Tarboton e Goodwin (1998) e o TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability), desenvolvido por Baum, Savage e Godt (2002). Conforme o apresentado na Tabela 10, cada modelo demanda diferentes tipos e quantidade de parâmetros.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para cada modelo.

SHALSTAB	SINMAP	TRIGRS
- Coesão do solo;	- Coesão do solo;	- Coesão do solo;
- Ângulo de atrito do solo;	- Ângulo de atrito interno;	- Ângulo de atrito interno;
- Massa específica do solo;	- Massa específica do solo;	- Massa específica do solo;
- Profundidade do solo;	- Profundidade do solo;	- Profundidade do solo;
	- Modelo Digital do Terreno;	- Modelo Digital do Terreno;

- Modelo Digital do Terreno.	- Taxa de transmissividade por recarga efetiva (T/q);	- Condutividade hidráulica saturada; - Difusividade hidráulica; - Conteúdo volumétrico de água em solo saturado; - Conteúdo volumétrico residual de água no solo; - Parâmetro α da equação de Gardner; - Intensidade da precipitação.
------------------------------	---	---

Fonte: Adaptado de Paul, Abatti e Michel (2019).

Cada modelo apontado, apresentam propriedades diferentes, desse modo, Formetta et al. (2014), definiu três princípios básicos que o modelo selecionado deve apresentar para uma avaliação satisfatória da suscetibilidade a escorregamentos: (1) Modelo hidrológico para estimativas de sucção e teor de umidade no solo; (2) Modelo de estabilidade para calcular o fator de segurança (FS); (3) Possibilitar a visualização dos resultados em ambiente SIG (Sistema de informação geográfica). Devido a essas características, além do fato de possuir código aberto, o TRIGRS foi o modelo selecionado para realização das análises de suscetibilidade dessa dissertação. Maiores detalhes sobre esse modelo são apresentados no Capítulo 3.

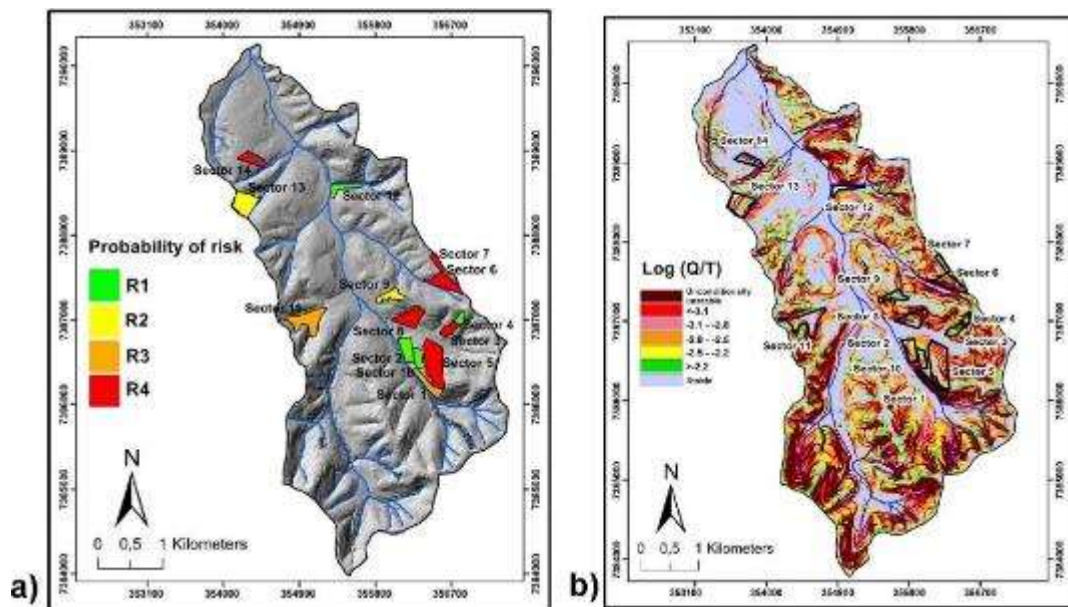
2.6.1 Experiência nacional e internacional no desenvolvimento de mapas de suscetibilidade através de modelos matemáticos

No cenário nacional alguns grupos de pesquisa fizeram uso de modelos matemáticos visando elaborar mapas de suscetibilidade. Entre os modelos disponíveis, o SHALSTAB e o TRIGRS foram os mais utilizados, vale mencionar os trabalhos de Fernandes et al. (2001); Guimarães et al. (2003); Zaidan e Fernandes (2009); Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010); Listo e Vieira (2012); Michel et al. (2014); Listo e Vieira (2015); Vieira et al. (2018); König, Kux e Mendes (2019) e Ávila et al. (2020) entre outros.

Listo e Vieira (2012), por exemplo, aplicaram o modelo SHALSTAB na bacia do rio Limoeiro na cidade de São Paulo (SP), região com 9 km², densamente urbanizada que possui histórico de deslizamentos. A modelagem foi realizada utilizando parâmetros geotécnicos e hidrológicos retirados da literatura ($C'=0$ kPa; $\Phi'=35^\circ$; $\gamma_{\text{sat}} = 17$ kN/m³). Em seguida, os resultados gerados são comparados com o mapa de risco da área. O risco foi categorizado em quatro níveis com base em fatores naturais e

antropogênicos: R1 (baixo risco), R2 (risco médio), R3 (alto risco) e R4 (risco muito alto). A suscetibilidade a deslizamentos foi dividida em 7 classes, variando entre incondicionalmente estável e incondicionalmente instável. A Figura 13 apresenta o mapa de risco e o mapa de suscetibilidade desenvolvido através do SHALSTAB.

Figura 13 - Bacia do rio Limoeiro, São Paulo (SP): a) Mapa das áreas de risco de deslizamento da Bacia do Rio Limoeiro; b) Mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo SHALSTAB.



Fonte: Adaptado de Listo e Vieira (2012).

A comparação entre os dois mapas da Figura 13 mostra que a localização das áreas previstas como instáveis pelo modelo coincidiram com as áreas de risco previamente mapeadas em campo. Esse acordo mostrou a influência da suscetibilidade na geração de áreas de risco e a influência da intervenção humana no desencadeamento de deslizamentos, visto que os locais classificados como instáveis estão localizados em setores com assentamento precário.

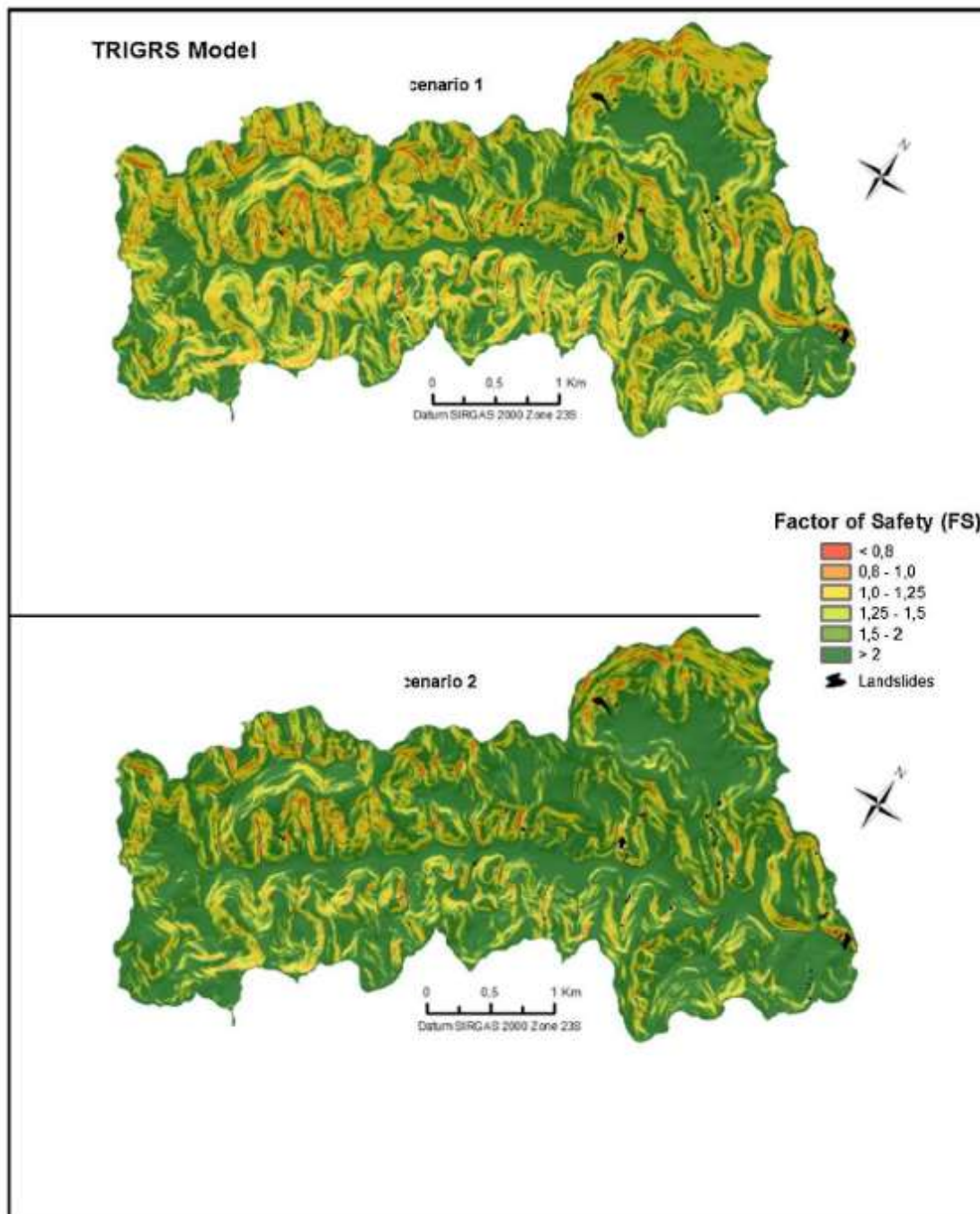
Ávila et al. (2020), por sua vez, aplicou os modelos FS FIORI e TRIGRS para gerar mapas de suscetibilidade para o Córrego Bengalar, região rural de São José dos Campos (SP), com aproximadamente 12 km². Os mapas foram gerados utilizando parâmetros geotécnicos e hidrológicos constantes para toda área ($C'=10$ kPa; $\Phi'=33^\circ$; $\gamma_{\text{sat}} = 20$ kN/m³; $k_{\text{sat}} = 6.95 \times 10^{-5}$ m/s). Por ser um modelo transiente, as análises utilizando o TRIGRS considerou dois cenários alterando as condições de chuva. O Cenário 1 considerou uma chuva de 80 mm distribuídas em 15h. O Cenário 2 considerou além desse evento pontual do Cenário 1, a chuva precedente, totalizando 258,46 mm distribuídos em 21 dias.

Os resultados gerados foram validados por meio da curva ROC, utilizando o índice *Area under the curve* (AUC) que quanto mais próximo da unidade, indica que o modelo conseguiu distinguir corretamente os verdadeiros positivos e verdadeiros negativos. O modelo FS FIORI classificou apenas 1,3% da área da bacia como instável, obtendo precisão de 65%. O Cenário 1 realizado por meio do modelo TRIGRS classificou 4,5% da área da bacia como instável, obtendo precisão de 72%. Do mesmo modo, o Cenário 2 do TRIGRS classificou 2,9% da área da bacia como instável, obtendo precisão de 71%. Conclui-se, portanto, que o TRIGRS apresentou maior precisão, indicando que os modelos transientes são mais eficientes.

A Figura 14 apresenta os mapas dos Cenários 1 e 2 gerados através do TRIGRS. Através da imagem é possível identificar as classes do fator de segurança (FS) adotada pelo autor e a localização das ocorrências de deslizamentos. Os resultados da modelagem mostraram que o Cenário 1 apresentou uma maior porcentagem de área instável e maior precisão na validação dos resultados, indicando que chuvas fortes e de curto prazo tendem a ter um impacto maior no FS do que chuvas leves e bem distribuídas.

O TRIGRS é o modelo de base física mais utilizado para desenvolver mapas de suscetibilidade internacionalmente e possui vários estudos de caso que utilizam a ferramenta como uma forma de prevê deslizamentos. Salciarini et al. (2006) utilizou o TRIGRS como ferramenta para preve deslizamento nas monstanhas dos Apeninos em Úmbria na Itália. A modelagem realizada considerou uma chuva considerada extrema para área, ou seja, 41mm distribuídos ao longo de 16h, e o modelo de infiltração saturada, sendo os parâmetros geotécnicos e hidrológicos determinados através análises paramétricas, utilizando como base dados disponíveis na literatura. De modo geral, foram definidas cinco zonas de propriedades baseadas na litologia da área. A comparação da área considerada instável ($FS \leq 1,00$) com o mapa de inventário dos deslizamentos apontou uma concordância geral de 80% entre os deslizamentos previstos e observados. Os autores concluem que o TRIGRS demonstrou ser útil para avaliações preliminares de estabilidade de taludes em grandes áreas, mas não pode fornecer avaliações de estabilidade para locais específicos porque isso requer estudos mais detalhados.

Figura 14 - Resultados de FS simulados pelo modelo TRIGRS.



Fonte: Adaptado de Ávila et al. (2020).

Park, Nikhil e Lee (2013) e Viet et al. (2017), por exemplo, utilizaram o TRIGRS para prever os 147 deslizamentos ocorridos entre 26 e 27 julho de 2011, numa área de 29,0 km², na montanha Woomyeon, Seul, Coréia do Sul, após chuva torrencial de 350mm, dos quais 147mm ficaram concentrado em 2 horas. Após investigação geológica-geotécnica, Park, Nikhil e Lee (2013), realizaram modelagem através do TRIGRS, considerando o modelo de infiltração inicialmente saturada e adotaram parâmetros médios e constate para toda área. Os resultados mostraram que a área

instável (que possui $FS \leq 1,00$) se expandiu progressivamente, alcançando no estágio mais crítico um percentual de acerto ($LR_{FS \leq 1,0}$) de 70,30%. Viet et al. (2017) aperfeiçoaram as modelagens realizadas por Park, Nikhil e Lee (2013), considerando o modelo de infiltração inicial não saturada e os parâmetros espacializados através de zonas, alcançando um percentual de acerto ($LR_{FS \leq 1,0}$) de aproximadamente 76%.

A Tabela 11 apresenta de forma sucinta algumas experiências brasileiras e internacionais na aplicação de modelos matemáticos para o desenvolvimento de mapas de suscetibilidade. Destaca-se que a maioria das pesquisas brasileiras estão concentradas nas regiões sul e sudeste do Brasil, sendo o SHALSTAB o modelo majoritariamente mais utilizado.

Tabela 11 – Resumo de algumas experiências brasileiras e internacionais na aplicação de modelos matemáticos para o desenvolvimento de mapas de suscetibilidade.

Autor(es)	Local de aplicação	Modelos utilizados	Parâmetros geotécnicos e hidrológicos	Área	Evento pluviométrico	Método de validação	Conclusão
Fernandes et al. (2001)*	Bacia dos rios Quitite e Papagaio, Rio de Janeiro (RJ), Brasil	SHALSTAB ¹	Considerados constantes em toda área analisada.	5,0 km ²	-	A localização das áreas críticas previstas pelo modelo é comparada com as cicatrizes de deslizamentos	- O potencial de deslizamento cresce com o aumento da declividade; - O potencial de deslizamento em encostas côncavas foi três vezes maior do que nas feições convexas e retilíneas; - 95% das cicatrizes mapeadas foram previstas pelo modelo.
Guimarães et al. (2003)*	Bacia dos rios Quitite e Papagaio, Rio de Janeiro (RJ), Brasil	SHALSTAB ¹	Foram elaborados 125 cenários alterando os parâmetros geotécnicos que são considerados constantes em toda área analisada.	5,0 km ²	-	A localização das áreas críticas previstas pelo modelo é comparada com as cicatrizes de deslizamentos	- Os cenários elaborados evidenciam que apesar da variação dos parâmetros geotécnicos as áreas classificadas como instáveis mantêm uma forte relação com a topografia; - Variações no peso específico do solo, entre 14,70-19,60 kN/m³, teve pouca influência nos resultados; - A coesão, que variou entre 0 e 8 kPa, foi o parâmetro geotécnico que mais influenciou os resultados
Salciarini et al. (2006)	Montanhas dos Apeninos, Úmbria, Itália.	TRIGRS ²	Parâmetros obtidos através da literatura e considerados constantes em toda área analisada. Os valores utilizados foram definidos por meio de estudo paramétrico. Em seguida, realizou-se análises considerando a especialização	100 km ²	41 mm em 16 h	A comparação da área considerada instável ($FS \leq 1.0$) com o mapa de inventário de deslizamentos	- A comparação da área instável com o mapa de inventário de deslizamentos, nas análises considerando parâmetros constantes, mostram uma superestimação da mesma em áreas íngremes na área de estudo. - De modo geral, comparando os resultados do TRIGRS com o mapa de inventário de deslizamentos, observou-se 80% de concordância entre os deslizamentos previstos e observados. - Os cenários elaborados evidenciam que as áreas classificadas como instáveis mantêm uma forte relação com a topografia, mas essa não é o único fator preponderante. - Os bons resultados dependem de um modelo digital de alta resolução, conhecimento da espessura do solo, altura inicial do nível de água e distribuição espacial das propriedades dos materiais.

			dos parâmetros por meio de cinco zonas de propriedades distintas baseadas na litologia.				- O TRIGRS demonstrou ser útil para avaliações preliminares de estabilidade de taludes em grandes áreas, mas não pode fornecer avaliações de estabilidade para locais específicos porque isso requer estudos mais detalhados.
Godt et al. (2008)	Puget Lowland em Seattle, Washington, Estados Unidos.	TRIGRS ³	Foram definidas três zonas de propriedade com base no mapeamento geológico da área. As propriedades dos materiais foram obtidas da literatura em pesquisas realizadas na área de estudo ou nas proximidades.	3,0 km ²	1,5 mm/h ao longo de 36 h (54 mm)	Aplicação da metodologia <i>Receiver Operator Characteristic (ROC)</i>	- A comparação do modelo TRIGRS com modelos estáticos, mostra que o TRIGRS tende a subestimar a área considerada instável ($FS \leq 1,0$) em relação aos modelos estáticos. - Consequentemente, os resultados do modelo TRIGRS são mais precisos em comparação aos modelos estáticos.
Zaidan e Fernandes (2009)*	Córrego Independência, Juiz de Fora (MG), Brasil	SHALSTAB ¹	Parâmetros <i>default</i> do software considerados constantes para toda área.	-	-	A localização das áreas críticas previstas pelo modelo é comparada com as cicatrizes de deslizamentos da área de modo analógico	- O processo de validação mostrou que apareceram células instáveis ou incondicionalmente instáveis dentro da área de cicatrizes, indicando que houve 100% de acerto, em relação à ocorrência de pelo menos uma célula instável ou incondicionalmente instável dentro da área de cada cicatriz.
Baum, Godt e Savage (2010)	Puget Lowland em Seattle, Washington, Estados Unidos.	TRIGRS ³	Foram definidas três zonas de propriedade com base no mapeamento geológico da área. As propriedades dos materiais	3,0 km ²	4,5 mm/h ao longo de 24h (108 mm)	Aplicação da metodologia <i>Receiver Operator Characteristic (ROC)</i>	- A utilização do modelo não saturado atenuou e atrasou a resposta da pressão de poros induzida pela chuva. Essa atenuação resultou em estimativas de tempo mais realistas para o início da instabilidade do talude; - O modelo saturado desenvolveu poro pressão positiva muito cedo. Além disso, a área considerada instável se estende para a maior parte da área de encostas íngremes em pouco tempo; - O modelo não saturado apresentou acurácia de 0,88;

			foram obtidas da literatura em pesquisas realizadas dentro ou próximas da área de estudo.				- O modelo saturado apresentou acurácia de 0,72.
Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010)*	Bacia hidrográfica da Copebrás, Cubatão- (SP), Brasil	TRIGRS ⁴	Considerados constantes em toda área em dois cenários distintos. Cenário A: utilizando parâmetros saturados; Cenário B: utilizando parâmetros não saturado (umidade natural).	3,6 km ²	308 mm em 18h	Foram aplicados dois índices: Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE)	- Os resultados mostraram boa concordância entre os cenários simulados e o mapa de cicatrizes; - Em áreas instáveis ($SF \leq 1$), os valores de CC ultrapassaram 50% em todos os cenários; - O aumento da espessura do solo de 1m para 2m aumentou o percentual de áreas instáveis em cerca de 10%; - As áreas classificadas como instáveis ($SF \leq 1$) estão localizadas em altitudes acima de 400 m e encostas com inclinação $> 40^\circ$; - O aumento no valor da coesão do solo, de 1 para 6 kPa, causa alterações significativas no FS, diminuindo a % de área instável para zero em alguns cenários; - As encostas mais suscetíveis são íngremes e apresentam formas retilíneas com camadas de solo mais finas.
Listo e Vieira (2012)*	Bacia do rio Limoeiro na cidade de São Paulo (SP), Brasil	SHALSTAB ¹	Parâmetros retirados da literatura e considerados como constantes para toda a área em análise.	9.0 km ²	-	Comparou o mapa gerado pelo modelo com o mapa de risco da área	- 20% da área de estudo foi classificada como incondicionalmente instável; - A localização das áreas previstas como instáveis pelo modelo coincide com as áreas de risco previamente mapeadas; - As áreas da bacia que foram classificadas como incondicionalmente instáveis apareceram associadas a encosta com inclinação $> 17^\circ$ e altitudes superiores a 800 m;
Park, Nikhil e Lee (2013)	Montanha Woomyeon, Seul, Coréia do Sul.	TRIGRS ⁵	Os parâmetros foram determinados por meio da coleta de amostras <i>in situ</i> . Em	29,0 Km ²	Precipitação acumulada de 350 mm, dos quais 147mm caiu em 2 h	Aplicação da metodologia LR _{Class}	- As áreas consideradas instáveis ($FS \leq 1,0$) expandiram-se progressivamente quando as chuvas se tornaram mais intensas; - 2,99% da área foi classificada como instável ($FS \leq 1,0$); - 33,33% dos deslizamentos reais foram localizados corretamente dentro da área instável prevista pelo TRIGRS;

			seguida, com base no banco de dados criado, foram utilizados os valores médios, considerados constantes para toda área.				- O percentual de acerto ($LR_{FS<1}$) é 70,30%; - Os resultados mostram concordância significativa entre o mapa de suscetibilidade e o inventário de deslizamentos do ponto de vista quantitativo.
Michel et al. (2014)*	Bacia do Rio Cunha (SC)	SHALSTAB ¹ e SINMAP ⁷	Parâmetros constantes para toda a área em análise determinados por meio de ensaios	16,2 km ²	15,33mm em 24h	Foram aplicados dois índices: índice de sucesso (Sul) e índice de erro (Erl)	- Ambos os modelos apresentaram resultados semelhantes; - Locais com declividades acentuadas, áreas com relevo côncavo e com maiores áreas de contribuição apresentam índices de estabilidade mais baixos; - O SHALSTAB classificou 6% da área total como instável; - O SINMAP classificou 30% da área total como instável; - O SHALSTAB quando calibrado corretamente apresenta resultados mais precisos; - O SINMAP apresentou melhor previsão das cicatrizes de deslizamento, porém superestima as áreas instáveis.
Listo e Vieira (2015)*	Bacia hidrográfica do rio Guaxinduba, município de Caraguatuba (SP)	TRIGRS ⁴	Considerados constantes em toda área. Cenário A: Utilizando parâmetros obtidos na literatura ($c'=1$ kPa; $\phi_i': 34^\circ$); Cenário B: Utilizando parâmetros obtidos por meio de ensaios utilizando solos da área de estudo ($c'=4$ kPa; $\phi_i': 34^\circ$);.	24,0 km ²	600 mm em 48h	Foram aplicados dois índices: Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE).	- O Cenário A: O TRIGRS classificou 72% da área da bacia como instável, obtendo precisão de 67%; - O Cenário B: O TRIGRS classificou 71% da área da bacia como instável, obtendo precisão de 67%; - Áreas instáveis sem a presença de cicatrizes - Cenário A: 30% / Cenário B: 28%; - Áreas estáveis com cicatrizes - Cenário A: 9% / Cenário B: 8%; - Os percentuais em ambas os cenários foram semelhantes, visto que os parâmetros utilizados foram quase idênticos, com exceção da coesão; - O uso de dados geotécnicos e hidrológicos coletados <i>in situ</i> (Cenário B) forneceu resultados mais precisos.

Viet et al. (2017)	Montanha Woomyeon, Seul, Coreia do Sul.	TRIGRS ⁶	Os parâmetros foram especializados através de 15 zonas que foram definidas com base nas propriedades do solo.	29,0 Km ²	Aproximadamente 410 mm distribuídos de maneira não uniforme em 24h	Aplicação da metodologia LR _{Class}	- Entre os 140 locais deslizamentos observados, o percentual de acerto ($LR_{FS<1}$) foi de aproximadamente 76%; - A avaliação da resolução do Modelo Digital do Terreno revelou que quanto maior a resolução, mais precisos são os resultados; - Os resultados usando um modelo para determinar a profundidade do solo mostraram uma melhoria significativa em relação ao estudo de Park, Nikhil e Lee (2013) que adotou uma espessura de solo uniforme.
Vieira et al. (2018)*	Bacia hidrográfica da Copebrás, Cubatão- (SP), Brasil	TRIGRS ⁴ e SHALSTAB ¹	Considerados constantes em toda área em dois cenários distintos. Cenário A: utilizando parâmetros saturados; Cenário B: utilizando parâmetros não saturados (umidade natural).	3,60 km ²	308 mm em 18h	Foram aplicados dois índices: Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE).	- A distribuição espacial das áreas instáveis e estáveis foi controlada por variáveis topográficas, principalmente em relação ao ângulo de inclinação e a forma da encosta; - As áreas classificadas como instáveis apresentam altitude acima de 400 m e inclinação > 40°; - Ambos os modelos se mostraram eficazes na previsão de deslizamentos rasos; - O modelo SHALSTAB tende a superestimar as áreas potencialmente instáveis;
König, Kux e Mendes (2019)*	Bairro Vila Albertina e Britador, Campos do Jordão (SP), Brasil	SHALSTAB ¹	Considerados constantes em toda área. Foram elaborados 3 cenários alterando o ângulo de atrito, a coesão e a espessura do solo.	Britador: 4,16 km ² Vila Albertina: 3,16 km ²	-	A localização das áreas críticas previstas pelo modelo é comparada com as cicatrizes de deslizamentos da área.	- SHALSTAB identificou áreas instáveis em encostas urbanas e os resultados corroboram com áreas de risco previamente mapeadas; - Cenários com maiores valores de coesão e ângulo de atrito interno são mais estáveis; - Áreas com intensa ocupação antrópica e a degradação ambiental alteram a estabilidade das encostas, aumentando a probabilidade de ocorrência de deslizamentos;
Ávila et al. (2020)*	Córrego Bengalar, São José dos Campos- SP, Brasil	FS FIORI ⁸ e TRIGRS ⁴	Considerados constantes em toda área. As análises utilizando o TRIGRS	11,90 km ²	Cenário 1: 80 mm em 15h / Cenário 2: 258,46 mm em 21 dias	Aplicação da metodologia Receiver Operator Characteristic (ROC) Especificamente o índice Area Under	- O FS FIORI classificou apenas 1,3% de toda a bacia como instável, obtendo precisão de 65% - O Cenário 1 do TRIGRS classificou 4,5% de toda a bacia como instável, obtendo precisão de 72%; - O Cenário 2 do TRIGRS classificou 2,9% de toda a bacia como instável, obtendo precisão de 71%.

			considerou 2 cenários alterando as condições de chuva. Cenário 1: considerando chuvas de curto prazo; Cenário 2: considerando chuvas de longo prazo.				<i>the Curve</i> (AUC) que quanto mais próximo da unidade, mais precisa é a modelagem.	- O TRIGRS apresentou maior precisão, indicando que os modelos transientes são mais eficientes.
Ip, Rahardjo e Satyanaga (2020)	Cingapura	TRIGRS (usado para calcular a poropressão) e Scoops3D ⁹ (usado para calcular o FS)	As propriedades do solo da área de estudo estão disponíveis através de um banco de dados. Estas foram distribuídas de forma espacial usando <i>krigagem</i> ordinária.	3,40 km ²	22 mm/h ao longo de 24h (528 mm)	-		- A análise de fluxo realizada com o TRIGRS mostra que a poropressão negativa decresce ficando igual a zero em alguns locais indicando que o nível de água alcança a superfície. - O mapa de suscetibilidade mostra que a maior parte da área de estudo possui FS alto com apenas 0,054%, 0,127% e 0,275% da área apresentando FS muito baixo, FS baixo e FS moderado, respectivamente. - As áreas com FS muito baixo e baixo coincidem com poropressões quase positivas e positivas na superfície do solo. - Desse modo, o aumento do lençol freático é provavelmente um dos principais fatores que contribuem para causar instabilidade de taludes nessas áreas.
Marin, Velasquez e Sánchez (2021)	Bacia hidrográfica a La Liboriana, Salgar, Colombia	TRIGRS, SLIP e Iverson ¹⁰	As propriedades iniciais do solo foram selecionadas através da literatura com base na descrição geológica da área, dividida em duas zonas. Em seguida, os	59,0 Km ²	16 mm/h ao longo de 18h (288 mm)	Aplicação das metodologias Receiver Operator Characteristic (ROC) e LR _{Class}		- Os resultados mostraram que a retro-análise usando eventos de deslizamento pode ser uma boa alternativa para definir os parâmetros de entrada para modelos de base física; - Três modelos de base física (Iverson, SLIP e TRIGRS) apresentaram desempenho moderadamente bom considerando as altas incertezas das propriedades mecânicas e hidráulicas do solo - % área instável (FS≤1.0) - Iverson: 3,9%; SLIP: 2,1%; TRIGRS: 4,3%. - AUC - Iverson: 0,796; SLIP: 0,905; TRIGRS: 0,807. - %LR_{FS<1} - Iverson: 97,13; SLIP: 95,94; TRIGRS: 97,45.

resultados são comparados com o inventário, até se obter o melhor ajuste.

- A análise ROC e %LRclass são consideradas técnicas úteis para avaliar o desempenho da modelagem de escorregamentos.

LEGENDA:

*Pesquisas brasileiras.

NOTAS:

¹ Os resultados gerados pelo SHALSTAB, cuja variável principal é a razão hidrológica necessária para a instabilidade ($\log q/T$), é classificada automática em sete classes: a) Incondicionalmente estável e saturado; b) Incondicionalmente estável e não saturado ($\log q/T > -2.2$); c) Estável e não saturado ($\log q/T$ entre -2.5 e -2.2); d) Instável e não saturado ($\log q/T$ entre -2.8 e -2.5); e) Instável e saturado ($\log q/T$ entre -3.1 e -2.8); f) Incondicionalmente instável e não saturado ($\log q/T < 3.1$); g) Incondicionalmente instável e saturado.

² Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em duas classes: a) $FS \leq 1,0$; b) $FS > 1,0$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

³ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em quatro classes: a) $FS \leq 1,0$; b) FS entre $1,0 - 1,1$; c) FS entre $1,1 - 1,2$; d) $FS > 1,2$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

⁴ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em cinco classes: a) até $0,8$; b) entre $0,8 - 1,0$; c) entre $1,0 - 1,2$; d) entre $1,2 - 1,5$; e) acima de $1,5$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

⁵ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em sete classes: a) $FS \leq 1,0$; b) FS entre $1,0 - 1,2$; c) FS entre $1,2 - 1,4$; d) FS entre $1,4 - 1,6$; e) FS entre $1,6 - 1,8$; f) $1,8 - 2,0$; g) $FS > 2,0$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

⁶ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS em sete classes: a) $FS \leq 1,0$; b) FS entre $1,00 - 1,25$; c) FS entre $1,25 - 1,50$; g) $FS > 1,50$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

⁷ O SINMAP calcula o Índice de Estabilidade (SI) que é definido como a probabilidade de um local ser estável – $SI = \text{Prob}(FS > 1,0)$. Desse modo, o modelo classifica automaticamente o resultado gerado em seis classes: a) Incondicionalmente estável ($SI > 1,5$); b) Moderadamente estável ($1,5 > SI > 1,25$); c) Quase estável ($1,25 > SI > 1,0$); d) Limite inferior de estabilidade ($1,0 > SI > 0,5$); e) Limiar superior de estabilidade ($0,5 > SI > 0,0$); f) Instabilidade incondicional ($SI > 0,0$).

⁸ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo FS FIORI em cinco classes: a) até $0,8$; b) entre $0,8 - 1,0$; c) entre $1,0 - 1,2$; d) entre $1,2 - 1,5$; e) acima de $1,5$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

⁹ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo Scoops3D em quatro classes: a) FS muito baixo ($FS \leq 1$); b) FS baixo ($1 < FS \leq 1,25$); c) FS moderado ($1,25 < FS \leq 1,5$) e d) FS alto ($FS > 1,5$). Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

¹⁰ Os autores classificaram os fatores de segurança (FS) calculados pelo TRIGRS, SLIP e Iverson em três classes: a) $FS \leq 1,0$; b) FS entre $1,0-1,3$; c) $FS > 1,3$. Foi considerado como instável as células que apresentaram $FS \leq 1,0$.

Fonte: O Autor (2022).

2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi visto que talude é a designação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha (GERSCOVICH, 2016). E que devido a dinâmica natural da superfície terrestre esses estão sujeitos a diversos processos de instabilização, tais como deslizamentos, quedas, rastejo, erosões e recalques. Devido à complexidade os movimentos gravitacionais de massa, surgiram várias classificações, cujo objetivo principal é unificar a linguagem técnica e facilitar o intercâmbio de informações entre os pesquisadores da área. Nessa dissertação é detalhada a proposta de Hungr, Leroueil e Picarelli (2014) que se trata de uma atualização das classificações de Varnes (1978).

Outro tópico tratado é a análise de estabilidade que tem o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrência de deslizamentos em encostas e taludes construídos (GERSCOVICH, 2016). Além disso, foi verificado que na prática corrente da geotecnia, a estabilidade de talude é definida usualmente em termos determinísticos, por meio do cálculo do Fator de Segurança (FS), aplicando o Método do Equilíbrio Limite, em virtude de sua simplicidade e precisão.

No item referente a análise de suscetibilidade a deslizamentos, foi apresentado que esta pode ser determinada através de diferentes metodologias (avaliação direta; superposição de fatores condicionantes; métodos probabilísticos, métodos determinísticos e etc.). Os métodos determinísticos, objeto dessa pesquisa, são sustentados em leis físicas e buscam diminuir a subjetividade da classificação dos graus de suscetibilidade por meio do cálculo do Fator de Segurança (LISTO, 2015). Devido aos critérios definidos por Formetta et al. (2014), o modelo selecionado para esta dissertação é o “Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability”, TRIGRS. Maiores detalhes sobre esse modelo são apresentados no Capítulo 3.

3 O MODELO TRIGRS

Nesse capítulo será apresentado de maneira sucinta o modelo utilizado nessa dissertação, denominado como “Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability”, TRIGRS. Serão apresentados: a base teórica do modelo; os dados de entrada e saída, além da metodologia utilizadas para validar os resultados, especificadamente, a L_R Class.

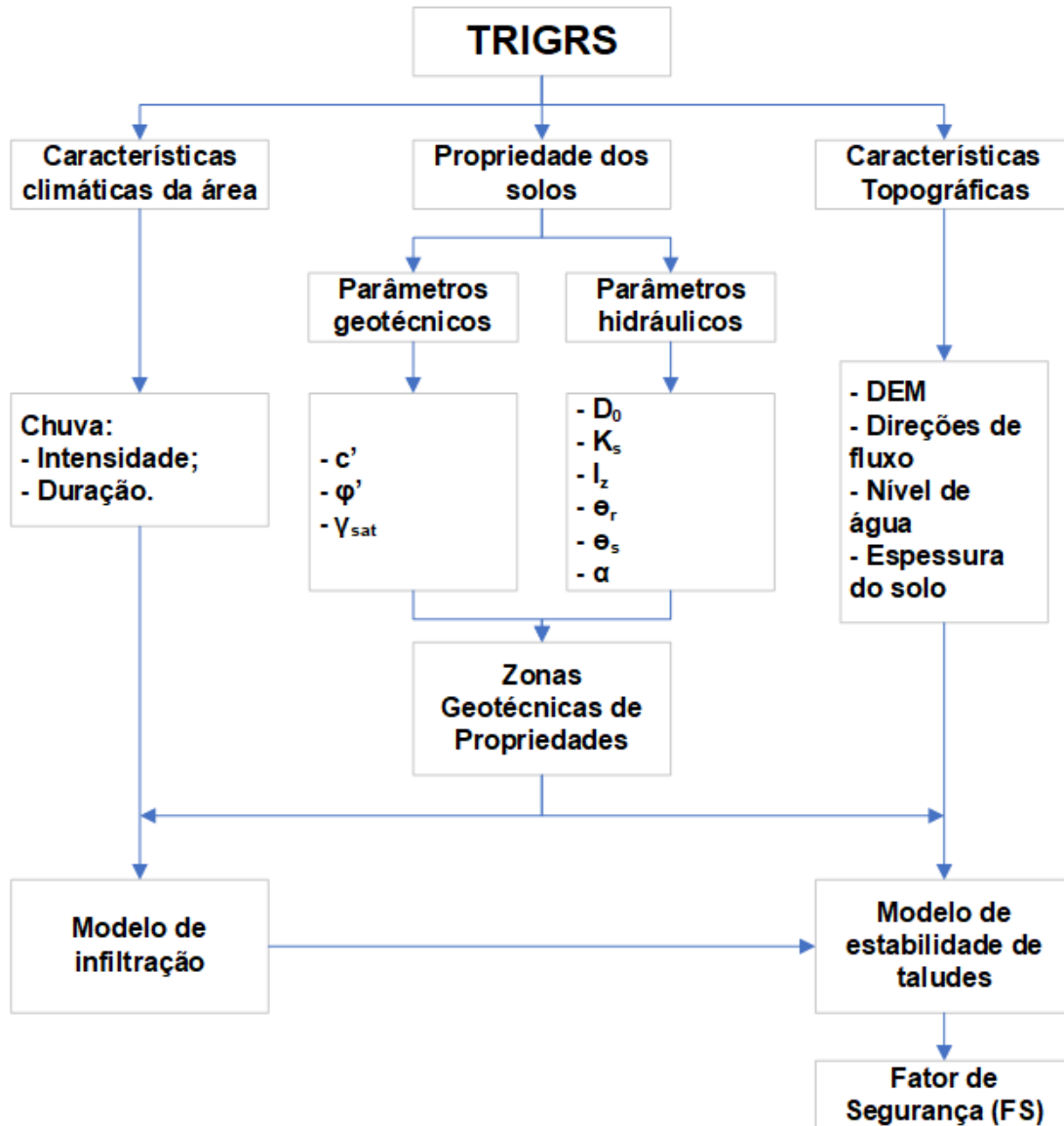
3.1 APRESENTAÇÃO

O Modelo “Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability”, TRIGRS, é um software desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS), programado em linguagem Fortran. O TRIGRS é aplicável em áreas propensas a deslizamentos rasos translacionais induzidos pela chuva. Essa ferramenta integra um método de análise de estabilidade para calcular o fator de segurança e um modelo hidrológico para estimar a variação transiente da poropressão devido à infiltração das águas das chuvas.

O programa trabalha com base no modelo digital do terreno e nos produtos que podem ser extraídos dele, como o mapa de inclinação e o mapa de direção de fluxo. O modelo também permite que as propriedades hidráulicas e os parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade variem sobre a área analisada. Após a etapa de cálculo, o modelo salva os resultados em uma série de arquivos, em tempos específicos, que permitem a observação da variação do fator de segurança e da poropressão em ambiente GIS.

Como ocorre em todos os modelos numéricos e analíticos, o TRIGRS também está submetido a simplificações e aproximações que resultam em algumas limitações. Entre elas destaca-se a impossibilidade de considerar períodos de chuva muito longos; a sensibilidade do modelo às condições iniciais; a desconsideração da evapotranspiração entre outras. A Figura 15 apresenta o modelo esquemático do procedimento realizado no programa TRIGRS, onde são definidas as entradas do modelo, entre elas as características climáticas, as propriedades dos solos e as características topográficas da área de estudo.

Figura 15 - Modelo esquemático de TRIGRS.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2013) e García-Aristizábal et al. (2019).

Onde c' a coesão efetiva do solo; φ' é o ângulo de atrito efetivo do solo; γ_{sat} é o peso específico do solo saturado; D_0 é a difusividade hidráulica saturada; K_s é o coeficiente de permeabilidade saturada; θ_r é o teor volumétrico residual de água do solo e θ_s é o teor volumétrico de água correspondente a saturação do solo e α é um parâmetro de ajuste da curva característica proposto por Gardner (1958) e denota a distribuição do tamanho dos poros do solo.

3.2 BASE TEÓRICA DO MODELO

O TRIGRS combina um modelo de infiltração e roteamento de águas pluviais com um modelo de análise de estabilidade para calcular os efeitos da chuva na

estabilidade de taludes em escala regional. A seguir, é apresentada uma breve descrição dos modelos e equações usados pelo TRIGRS.

3.2.1 Modelo Hidrológico

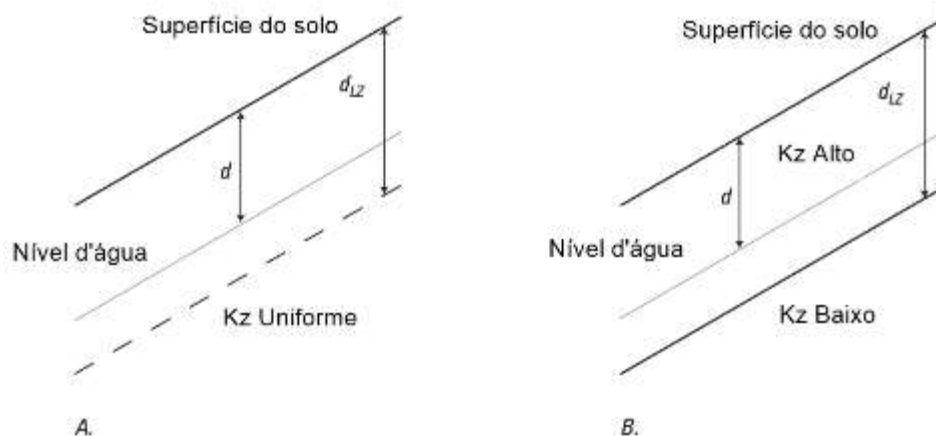
Nesse item serão apresentados o modelo de infiltração para as condições iniciais saturadas e não saturadas. Além do modelo de infiltração, escoamento e roteamento.

3.2.1.1 Modelo de infiltração para condições iniciais saturadas

O modelo de infiltração utilizado pelo TRIGRS para as condições iniciais saturada é baseado na solução linearizada de Iverson (2000) para a equação de Richards. Essa solução é composta por duas componentes de fluxo, uma componente estacionária e outra transiente (BAUM; GODT; SAVAGE, 2010). Nesse modelo, assume-se que o processo de infiltração é vertical, unidimensional, com fluxo predominantemente vertical.

A poropressão do lençol freático é calculada através das Equações (6) e (7) para duas condições de contorno distintas, conforme o apresentado na Figura 16. A Equação (6) representa a condição de contorno ilustrada na Figura 16-A, e se aplica onde as propriedades hidráulicas são uniformes em profundidade. A Equação (7) caracteriza a condição de contorno apresentada na Figura 16-B, e deve ser utilizada quando existe uma diminuição pronunciada da condutividade hidráulica numa profundidade bem definida. Devido as características da área de estudo, adotou-se para essa dissertação a condição de contorno da Equação (6).

Figura 16 - Seções esquemáticas mostrando as condições de contorno assumidas pelas Equações 6 e 7.



Fonte: Baum, Savage e Godt (2009).

Na Figura 16, K_Z é a condutividade hidráulica saturada; d é a profundidade inicial do lençol freático; d_{LZ} é a profundidade máxima, na direção Z.

Como resultado de aproximações feitas na linearização da equação de Richards, as equações são válidas para solos homogêneos com profundidades rasas. O primeiro termo da Equação (6) representa a componente estacionária e os termos restantes representam a componente transiente.

$$\begin{aligned} \psi(Z, t) = & (Z - d)\beta \\ & + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_s} \left\{ H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \\ & - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_s} \left\{ H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \psi(Z, t) = & (Z - d)\beta \\ & + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_s} H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m - 1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right. \\ & \left. + \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m - 1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

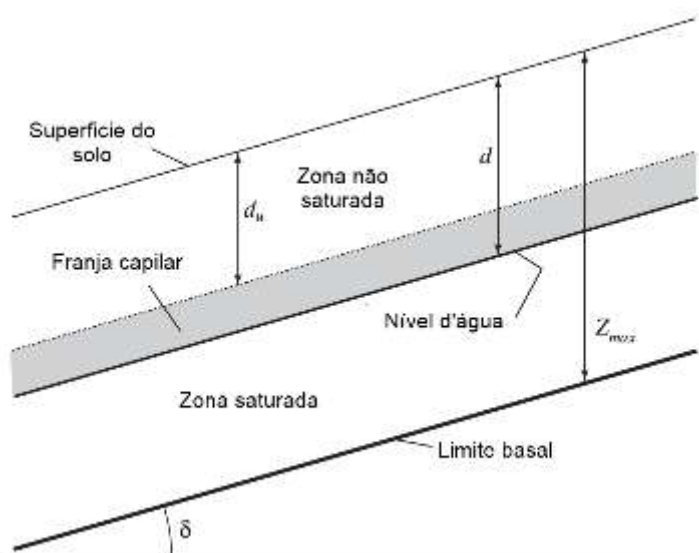
$$\begin{aligned}
& -2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_s} H(t \\
& \quad - t_{n+1}) [D_1(t \\
& \quad - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right. \\
& \quad \left. + ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}
\end{aligned}$$

Onde $\psi(Z, t)$ é a poropressão do lençol freático; t é o tempo; $Z = z/\cos \delta$ em que Z é a coordenada vertical, z é a coordenada normal a inclinação e δ é o ângulo de inclinação do talude; d é a profundidade do lençol freático; $\beta = \cos^2 \delta - (I_{ZLT}/K_s)$ em que I_{ZLT} é a taxa de infiltração inicial e o K_s é o coeficiente de permeabilidade saturada; I_{nZ} é o fluxo superficial no n ésimo tempo; $D_1 = D_0/\cos^2 \delta$ em que D_0 é a difusidade hidráulica saturada; N é o numero de intervalos de tempo; $H(t - t_n)$ é a função de Heaviside, utilizada para representar a variação do fluxo durante a ocorrências de chuvas de intensidade constante, em que t_n é o tempo no n ésimo intervalo em uma sequência de infiltração de chuva. De forma exclusiva, na Equação (7), a variável d_{LZ} denota a profundidade do limite basal impermeável na direção Z . A função $ierfc$ aplicada nas Equações (6) e (7), é uma função complementar utilizada para calcular o erro.

3.2.1.2 Modelo de infiltração para condições iniciais não saturadas

O TRIGRS aplica soluções analíticas de fluxo não saturado para modelar as condições iniciais não saturadas. Nesse sistema o solo é dividido em duas camadas, como mostrado na Figura 17. A primeira camada consiste na zona saturada, localizado abaixo do nível d'água, incluindo a franja capilar. A segunda camada consiste na zona não saturada, e se encontra acima da franja capilar e se estende até a superfície do solo.

Figura 17 - Condições iniciais não saturada do solo em encostas.



Fonte: Baum, Savage e Godt (2009).

Na Figura 17, d_u é a profundidade da zona não saturada acima do lençol freático; d é a profundidade entre a superfície do solo e o nível d'água e o Z_{max} é a profundidade do limite basal.

Nesse modelo, a zona não saturada absorve parte da água que se infiltra na superfície do solo. A água infiltrada se acumula na base da camada não saturada e eleva o nível d'água. O TRIGRS utiliza os parâmetros θ_r , θ_s , α , K_s retirados do modelo de ajuste da curva característica do solo proposto por Gardner (1958), para aplicar as propriedades dessa relação na parcela de solo não saturado. Ressalta-se que na condição não saturada, assume-se que o processo de infiltração é vertical, unidimensional, com fluxo predominantemente vertical.

Para explicar a infiltração e o fluxo vertical através da zona não saturada, aplica-se a forma unidimensional da equação de Richards, explicitada na Equação (8). O efeito da superfície inclinada na infiltração e no fluxo vertical, é considerado por meio do emprego da transformação de coordenadas proposta por Iverson (2000), obtendo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(\psi) \left(\frac{1}{\cos^2 \delta} \frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

A relação da condutividade hidráulica e do conteúdo volumétrico de água com a poropressão da Equação (8), são descritas pelas Equações (9) e (10) e tratam-se do modelo de condutividade não saturada e do modelo de ajuste da curva característica do solo desenvolvidos por Gardner (1958), respectivamente.

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha\psi^*) \quad (9)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha\psi^*) \quad (10)$$

Onde o parâmetro α é retirado da curva característica ajustada com a Equação (10) e denota a distribuição do tamanho dos poros do solo; ψ é a poropressão, expressa por $\psi^* = \psi - \psi_0$, onde ψ_0 é uma constante; K_s é o coeficiente de permeabilidade saturada; $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica em função da poropressão; θ é o teor volumétrico de água do solo; θ_r é o teor volumétrico residual de água do solo e θ_s é o teor volumétrico de água correspondente a saturação do solo; $\psi_0 = -1/\alpha$, representa a poropressão da franja capilar acima do lençol freático e $1/\alpha$ representa a altura da franja capilar acima do lençol freático.

A substituição das Equações (9) e (10) na versão unidimensional da Equação de Richards (8) a torna uma equação diferencial parcial linear, apresentada na Equação (11).

$$\frac{\alpha_1(\theta_s - \theta_r)}{K_s} \frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial^2 K}{\partial Z^2} - \alpha_1 \frac{\partial K}{\partial Z} \quad (11)$$

Em que $\alpha_1 = \alpha \cos^2 \delta$. A poropressão na zona não saturada na profundidade Z e no tempo t é obtido por meio da Equação (12), por meio da aplicação das soluções fornecidas por Srivastava e Yeh (1991).

$$\psi(Z, t) = \frac{\cos \delta}{\alpha_1} \ln \left[\frac{K(Z, t)}{K_s} \right] + \psi_0 \quad (12)$$

Mais detalhes sobre o desenvolvimento das Equações (11) e (12), e seus parâmetros, estão descritos nos estudos de Baum, Savage e Godt (2009, 2010).

3.2.1.3 Infiltração, Escoamento e Roteamento

O TRIGRS usa um método simples para direcionar o escoamento de águas pluviais de células saturadas para células adjacentes, onde ele pode se infiltrar ou fluir para células à jusante. No modelo o escoamento ocorre quando a precipitação fornecida para uma determinada célula excede sua infiltrabilidade. Segundo Iverson (2000), a condutividade hidráulica, geralmente é igual ao coeficiente de permeabilidade saturada, K_s , em solos saturados.

O cálculo da infiltração, I , em cada célula é a soma da precipitação, P , mais o escoamento das células a montante, R_u , de modo que a infiltração não pode exceder

a condutividade hidráulica saturada, K_s . Esse raciocínio é expresso pelas Equações (13) e (14).

$$I = P + R_u, \text{ se } P + R_u \leq K_s \quad (13)$$

Ou

$$I = K_s, \text{ se } P + R_u > K_s \quad (14)$$

Em cada célula onde $P + R_u$ excede K_s , o excesso é considerado escoamento superficial, R_d , e é desviado para as células descendentes a jusante. Do mesmo modo, esse raciocínio é expresso pelas Equações (15) e (16).

$$R_d = P + R_u - K_s, \text{ se } P + R_u - K_s \geq 0 \quad (15)$$

Ou

$$R_d = 0, \text{ se } P + R_u - K_s < 0 \quad (16)$$

3.2.2 Modelo de Estabilidade

O TRIGRS calcula o fator de segurança (FS) aplicando o método do talude infinito. Nesse método, o FS é definido como a razão entre as forças resistentes (R) e as forças instabilizadoras (S) atuantes na superfície potencial de ruptura. Baseado nessa definição, o modelo assume que a ruptura de uma célula da grade ocorre quando as forças resistentes, atuando na superfície crítica são menores que as forças instabilizadoras (RAIA et al., 2013).

A força resistente ao longo do plano potencial de ruptura é dado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O Fator de Segurança, FS, é calculado pelo TRIGRS através Equação (17).

$$F_s(Z, t) = \frac{R}{S} = \frac{\tan \varphi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan \varphi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta} \quad (17)$$

Onde c' a coesão efetiva do solo; φ' é o ângulo de atrito efetivo do solo; γ_w é o peso específico da água; γ_s é o peso específico do solo; δ é o ângulo de inclinação do talude; $\psi(Z, t)$ é poropressão, em função da profundidade Z e no tempo t . Deve ressaltar que na zona não saturada (acima do lençol freático) o fator de segurança é calculado multiplicando a sucção matricial $\psi(Z, t)\gamma_w$ por $\chi = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, sendo o valor de χ uma aproximação simplificada do parâmetro de tensão efetiva de Bishop (1959), conforme sugerido por Vanapalli e Fredlund (2000).

Nessa dissertação as classes de Fatores de Segurança foram divididas em 4 classes: 1) $FS \leq 1$ (instável); 2) $1 < FS \leq 1,25$ (marginalmente instável); 3) $1,25 < FS \leq 1,50$ (moderadamente estável); 4) $FS \geq 1,50$ (estável). Classificação similar é adotado por Viet et al. (2017) e Marín, Velásquez e Sánchez (2021).

3.3 DADOS DE ENTRADA DO MODELO

O software TRIGRS não possui interface gráfica, sendo executado por meio de linhas de comando. Todas as opções de cálculo, parâmetros e diretórios dos arquivos usados pelo modelo são especificadas por meio de um arquivo de inicialização. Este arquivo contém uma lista de diretórios, nomes de arquivos de entrada e constantes necessárias para realizar os cálculos do modelo. O funcionamento do TRIGRS consiste basicamente, em abrir o arquivo de inicialização, lê os dados e os arquivos de entrada, calcular e salva os resultados em uma série de arquivos.

A Tabela 12, apresenta os dados de entrada necessários para realizar as análises no TRIGRS. Os dados de entrada espacialmente variáveis devem ser dispostos em grade, em formatos ASCII. Alguns dos parâmetros físicos, como profundidade do lençol freático (d), profundidade do solo (Z_{max}), taxa de infiltração inicial (I_z), intensidade de chuva, podem ser lidos como valores constantes ou espacialmente variáveis. Na Tabela 12, estão marcados com (*) os dados que podem ser inseridos de forma espacialmente variável ou de modo constante no modelo.

Tabela 12 - Arquivos de entrada do TRIGRS.

Nome do arquivo	Descrição
"dem.asc"	Grade contendo dados topográficos da área de estudo (Modelo Digital do Terreno)
"slope.asc"	Grade contendo a inclinação da área de estudo em graus
"zones.asc" (*)	Grade contendo as zonas de propriedades da área de estudo
"zmax.asc" (*)	Grade contendo a profundidade do limite basal
"depthwt.asc" (*)	Grade contendo profundidade inicial do lençol freático
"rizero.asc" (*)	Grade contendo taxa de infiltração inicial
"ri.asc" (*)	Grade contendo a intensidade de chuva

Legenda:

(*) Dados que podem ser inseridos de forma espacialmente variável ou de modo constante no modelo.

As zonas de propriedade definem setores que possuem propriedades físicas diferentes dentro de uma mesma área de estudo. Dessa maneira, a grade contendo as zonas de propriedade determina como esses parâmetros físicos variam espacialmente. Os parâmetros atribuídos a cada zona são: c , φ , γ_s , D_0 , K_Z , θ_s , θ_r , e α . A Tabela 13 identifica e descreve os parâmetros físicos que devem ser atribuídos a cada zona.

Tabela 13 - Parâmetros atribuídos a cada zona de propriedade.

Nome do parâmetro	Descrição	Intervalo	Unidade
cohesion	Coesão do solo, c	$c > 0$	Pa
phi	Ângulo de atrito interno, φ	$\varphi > 0$	°
uws	Peso específico do solo, γ_s	$\gamma_s > 0$	N/m ³
diffus	Difusividade hidráulica, D_0	$D_0 > Z_{min}$	m ² /s
rzero	Taxa de infiltração inicial, I_z	$I_z > 0$	m/s
K-sat	Condutividade hidráulica do solo saturado, K_Z	$K_Z > 0$	m/s
Theta-sat	Conteúdo volumétrico de água no solo saturado, θ_s	$\theta_s > 0$	%
Theta-res	Conteúdo volumétrico residual de água no solo, θ_r	$\theta_s > \theta_r$ ≥ 0	%
Alpha	Denota a distribuição do tamanho dos poros do solo, aproximadamente igual ao inverso da altura da franja capilar	$\alpha > 0$	1/m

Fonte: Adaptado de Baum, Savage e Godt (2009).

3.4 DADOS DE SAÍDA DO MODELO

As principais informações geradas pelo modelo são: a) grade contendo o fator mínimo de segurança; b) a poropressão e; c) a profundidade em que o fator de segurança mínimo ocorre. A Tabela 14 identifica e descreve os vários arquivos de saída do TRIGRS.

Tabela 14 - Arquivos de saída do TRIGRS.

Nome do arquivo	Descrição
Trigrs_Log.txt	Arquivo com o registro das operações do modelo.
TRrunoffPer##XXX.asc	Grade contendo o escoamento em (m/s) calculado durante um período de chuva; ## designa o período calculado.
TRfs min_XXX.asc	Grade contendo o fator de segurança mínimo calculado para cada célula ao final de cada período de chuva.
TRZ at_fs minXXX.asc	Grade contendo a profundidade do fator de segurança mínimo obtido em cada célula ao final de cada período de chuva.
TRp_at_fs minXXX.asc	Grade contendo a poropressão na profundidade onde o fator segurança mínimo é calculado.
TRinfiltratPer##XXX.asc	Grade contendo a taxa de infiltração referente ao período de chuva considerado.
TRunszfluxTS##XXX.asc	Grade contendo o fluxo basal na região não saturada referente ao período de chuva considerado.
TRlist z p_fsXXX.txt	Arquivo com a lista da poropressão e fator de segurança calculados para as diferentes profundidades e tempos em cada célula.
TRwater depthXXX.asc	Grade contendo o registro da profundidade do lençol freático em cada célula.
TRwater elevXXX.asc	Grade contendo o registro da altura do lençol freático em cada célula.

Fonte: Adaptado de Baum, Savage e Godt (2009).

3.5 LIMITAÇÕES

Todos os modelos numéricos e analíticos estão submetidos a simplificações, aproximações. Logo, da mesma forma que ocorre em outras propostas que integram um modelo de estabilidade de taludes e um modelo hidrológico, o TRIGRS também está sujeito a limitações. As principais restrições são listadas de forma sucinta a seguir:

- O modelo assume que o fluxo ocorre em solo homogêneo e isotrópico, então aplicações em regiões com solos anisotrópicos e heterogêneos em relação a propriedades hidrológicas podem gerar resultados não representativos;
- O TRIGRS simula a infiltração vertical em uma dimensão, sendo, portanto, mais adequado para determinar as variações da poropressão em eventos de chuva mais curtos. Em eventos longos, o fluxo lateral passa a ser uma variável importante na determinação da distribuição da poropressão, limitando assim a aplicação do modelo nesses casos.

- Os resultados são muito sensíveis às condições iniciais definidas pelo usuário. É recomendável que a profundidade inicial do lençol freático e a taxa de infiltração inicial da área sejam bem conhecidas, caso contrário, o modelo pode produzir resultados pouco representativos.
- O modelo usa um método simples para calcular o escoamento superficial e não considera a evapotranspiração, assumindo que durante um evento de chuva o efeito dessa variável pode ser desprezado.
- O modelo utilizado para analisar a estabilidade do talude é o método do talude infinito, que assume declividade, espessura e propriedades físicas uniformes ao mesmo tempo que trata a poropressão como uma função da profundidade e do tempo. Assim, o modelo é mais preciso quando as condições naturais da área favorecem a ruptura do tipo planar.

3.6 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS - L_R Class

Os resultados gerados pelo TRIGRS, podem ser comparados com os locais onde, de fato, ocorreram deslizamentos por meio de vários métodos a fim de verificar o desempenho do modelo. No entanto, nessa dissertação será utilizado o método L_R class - Landslide Ratio of each FS Class – traduzido como taxa de deslizamento para cada classe de FS.

A metodologia L_R Class foi proposta por Park, Nikhil e Lee (2013) e representa a relação entre a porcentagem de deslizamentos dentro de uma classe específica do Fator de Segurança (FS) em comparação com o registro de ocorrência de deslizamentos (MARIN; VELASQUEZ; SÁNCHEZ, 2021).

Esse método surgiu como uma alternativa a outros índices de desempenho, como a curva ROC (Receiver Operating Characteristic Curve), que necessita da área precisa dos deslizamentos para fornecer resultados confiáveis (PARK; NIKHIL; LEE, 2013). Em outras palavras, este índice foi desenvolvido para verificação do desempenho de modelos matemáticos aplicados em regiões onde o registro de deslizamentos é composto por pontos, ou seja, os locais são conhecidos, mas os limites das cicatrizes do deslizamento não (TRAN et al., 2017).

Pode-se calcular o LR_{class} para uma determinada faixa (classe) de FS utilizando a Equação (18).

$$L_R = \frac{c}{d} \quad (18)$$

Em que: c é a porcentagem dos deslizamentos contidos dentro da área de uma determinada classe de FS em relação ao número total de eventos; e d é a porcentagem da área da respectiva classe de FS, prevista pelo modelo, em relação a área total da área de estudo. O resultado quantitativo em porcentagem da área com $FS \leq 1,00$ ($\%LR_{FS \leq 1}$) é dado pela razão entre o $LR_{FS \leq 1}$ pelo somatório das demais LR_{class} calculadas para outras classes de FS, conforme o expresso pela Equação (19).

$$\% LR_{FS < 1} = \frac{LR_{FS < 1}}{\sum LR_{class}} \quad (19)$$

As Equações apresentadas mostram que quanto maior a porcentagem de ocorrências localizadas dentro da área classificada como instável ($FS \leq 1,00$), maior será a $\% LR_{FS \leq 1}$. Entretanto, os resultados também são influenciados pelo tamanho relativo da área prevista como instável, de modo que, quanto menor a área prevista, maior será $LR_{FS < 1}$, e, conseqüentemente, a precisão do mapa de suscetibilidade gerado. Por fim, conclui-se que a $\%L_R$ class indica a chance em porcentagem de um deslizamento ocorrido na área de estudo estar incluído na área prevista como instável ($FS \leq 1,00$).

A Tabela 15 apresenta o resultado obtido em pesquisas que utilizaram essa metodologia.

Tabela 15 - L_R class de pesquisas realizadas com TRIGRS.

Autor(es)	$L_R FS \leq 1$ (%)
Park, Nikhil e Lee (2013)	70,30
Viet et al. (2017)	75,87
Tran et al. (2017)	64,18
Marin, Velasquez e Sánchez (2021)	97,45

Fonte: O Autor (2022).

Conforme o apresentado na Tabela 15 os resultados calculados por Park, Nikhil e Lee (2013), criador dessa metodologia, para sua área de estudo, foi superior a 70%, sendo considerado, pelos autores, um bom resultado. A Tabela 16 apresenta a validação realizada por Park, Nikhil e Lee (2013), assim como o modelo de tabela utilizado para a realização dos cálculos.

Tabela 16 – Validação realizada por Park, Nikhil e Lee (2013)

Classe de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamentos (c) = a/b	% Área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e) = c/d	% LR_{class} = e/f
$FS \leq 1,0$	49	33,33 %	2,99 %	11,14	70,30 %
$1,0 < FS \leq 1,2$	59	40,14 %	13,68 %	2,93	18,51 %
		.			
		.			
		.			
$2,0 < FS$	6	4,08 %	31,39 %	0,13	0,82 %
Somatório	147 (b)	100 %	100 %	15,85 (f)	100 %

Fonte: Adaptado de Park, Nikhil e Lee (2013).

3.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O Modelo “Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability”, TRIGRS, é um software desenvolvido pela USGS. O TRIGRS é aplicável em áreas propensas a deslizamentos translacionais induzidos por precipitação. Essa ferramenta combina um modelo de infiltração e roteamento de águas pluviais com um modelo de análise de estabilidade para calcular os efeitos da chuva na estabilidade de taludes em escala regional.

O TRIGRS calcula o fator de segurança (FS) utilizando o método do talude infinito. As classes de Fatores de Segurança nesse estudo foram divididas em 4 classes: 1) $FS \leq 1$ (instável); 2) $1 < FS \leq 1,25$ (marginalmente instável); 3) $1,25 < FS \leq 1,50$ (moderadamente estável); 4) $FS \geq 1,50$ (estável).

Os resultados gerados pelo TRIGRS, podem ser comparados com os locais onde, de fato, ocorreram deslizamentos. Existem diversos métodos para validar esses resultados, no entanto, nessa dissertação será utilizado o método L_R class. Desenvolvido para classificação do desempenho de modelos aplicados em regiões onde os deslizamentos ocorridos são representados por pontos.

4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

Nesse capítulo serão apresentadas informações relevantes sobre a área de estudo, incluindo a localização, a área de abrangência, aspectos climáticos, aspectos geológicos e geomorfológicos. Ademais, devido a relevância dentro do tema tratado, o item 4.2 compreende os números das ocorrências de deslizamentos da área de estudo entre os anos de 2014 e 2020. Enquanto que o item 4.3 mostra a localização dessas ocorrências.

4.1 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

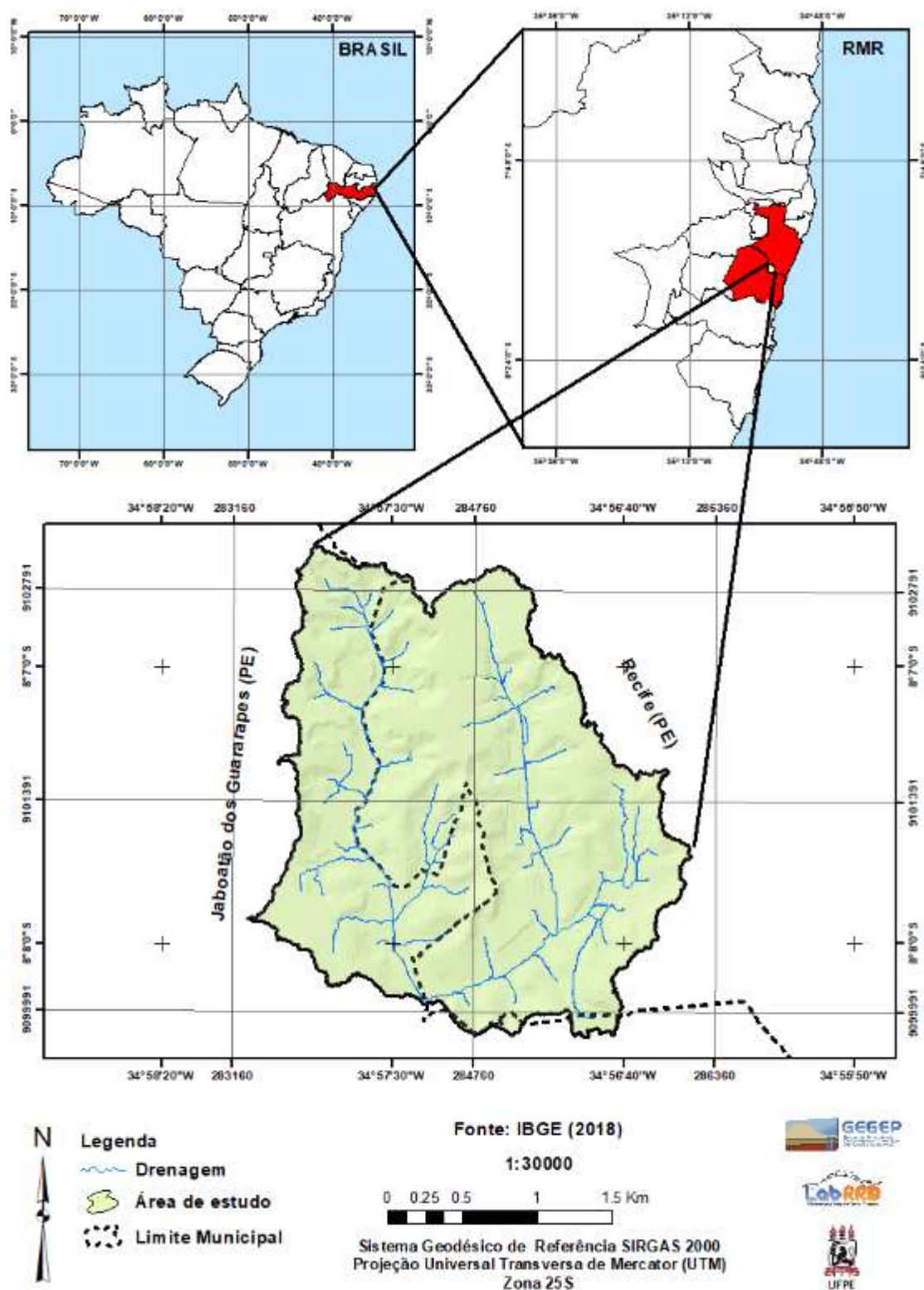
A área de estudo desta pesquisa trata-se de uma bacia hidrográfica, com área aproximada de 6,16 km², localizada no estado de Pernambuco na região Metropolitana do Recife (RMR), abrangendo áreas dos municípios de Recife-PE e Jaboatão dos Guararapes-PE.

A bacia delimitada para essa pesquisa está situada em território urbano, densamente ocupado, constituído por várias comunidades composta por famílias que residem em encostas submetidas a frequentes deslizamentos, gerando assim, um grave problema socioambiental que vem demandando uma série de ações por parte da Defesa Civil (COUTINHO et al., 2017). Em campo são identificados ocupações irregulares, declividade acentuada, cortes, acúmulo de lixo e entulho em alguns locais, encanamentos expostos e outros fatores que favorecem a ocorrência de deslizamentos.

As bacias hidrográficas são áreas de tamanho variável de captação natural das águas pluviais que acaba por convergir para um único ponto de saída (exultório). A bacia hidrográfica é delimitada pelos divisores de águas superficiais, também chamados de topográficos (ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017). A Figura 18 apresenta o mapa de localização da área em estudo.

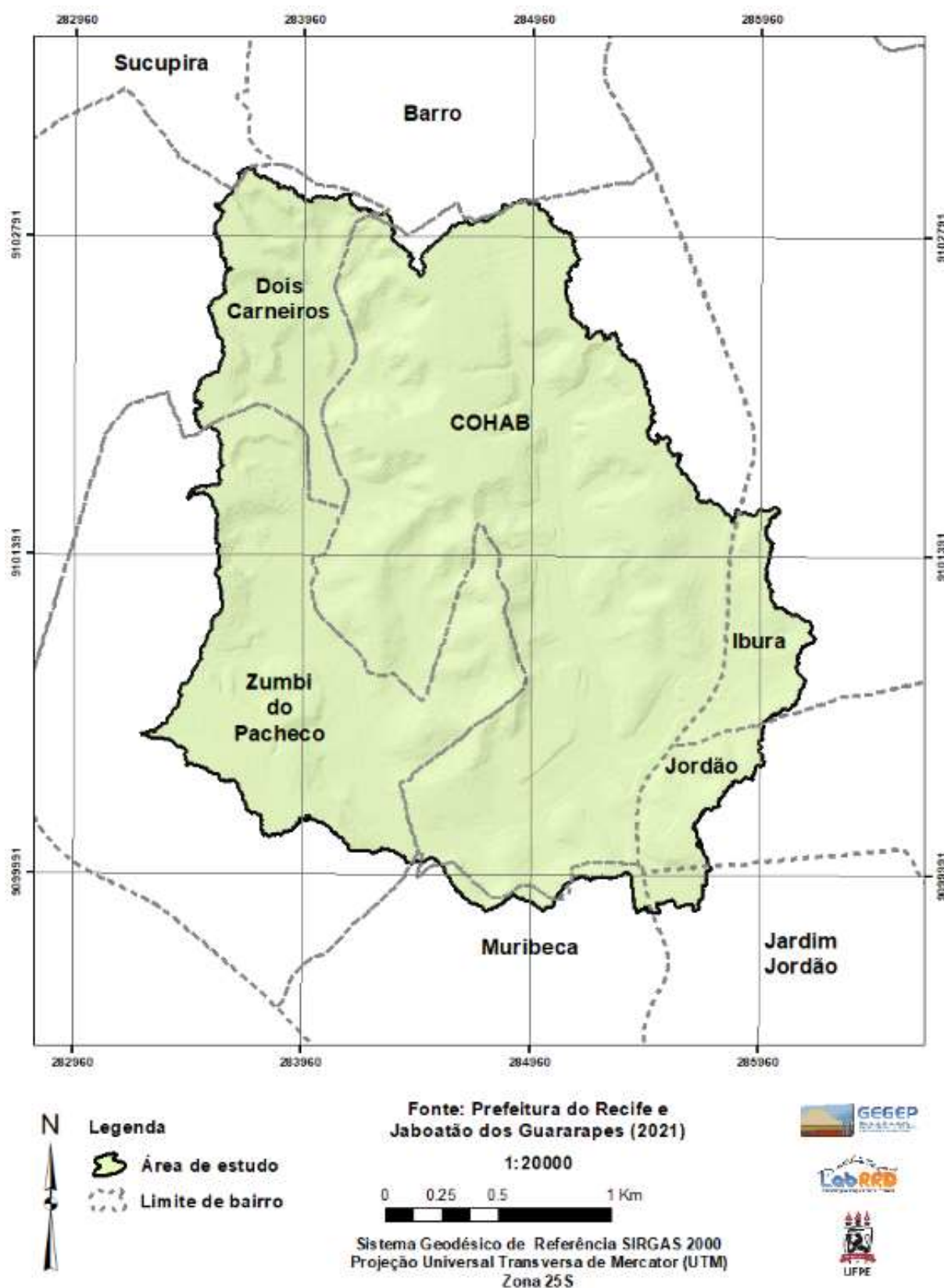
Por se tratar de uma bacia hidrográfica a área de estudo não se detém aos limites geográficos estabelecidos por entidades governamentais e intercepta trechos de vários bairros dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, conforme o apresentado no mapa da Figura 19. A área de estudo abrange predominantemente o bairro COHAB (representando 57,30% da área total) e trechos do Ibura (4,29%), Jordão (3,29%), Dois Carneiros (9,90%) e Zumbi do Pacheco (23,49%).

Figura 18 - Localização da área de estudo.



Fonte: GEGEP (2022).

Figura 19 - Bairros interceptados pela área de estudo.



Fonte: GEGEP (2022).

4.1.1 Aspectos Climáticos

O clima de um determinado local ou região é o resultado da análise de um conjunto de parâmetros das condições meteorológicas medidos ao longo de um determinado período de tempo. Os principais fatores para determinar o clima de uma região são: latitude, continentalidade, as correntes marítimas e a altitude. O Brasil, devido sua grande extensão territorial, possui uma extensa linha litorânea e vários sistemas de relevo, o que produz uma grande diversidade climática. Dessa maneira, cada região brasileira pode ser caracterizada por climas predominantes, a região nordeste, por exemplo, é caracterizada por um clima semiárido no interior e tropical úmido no litoral, esse último é o caso da RMR.

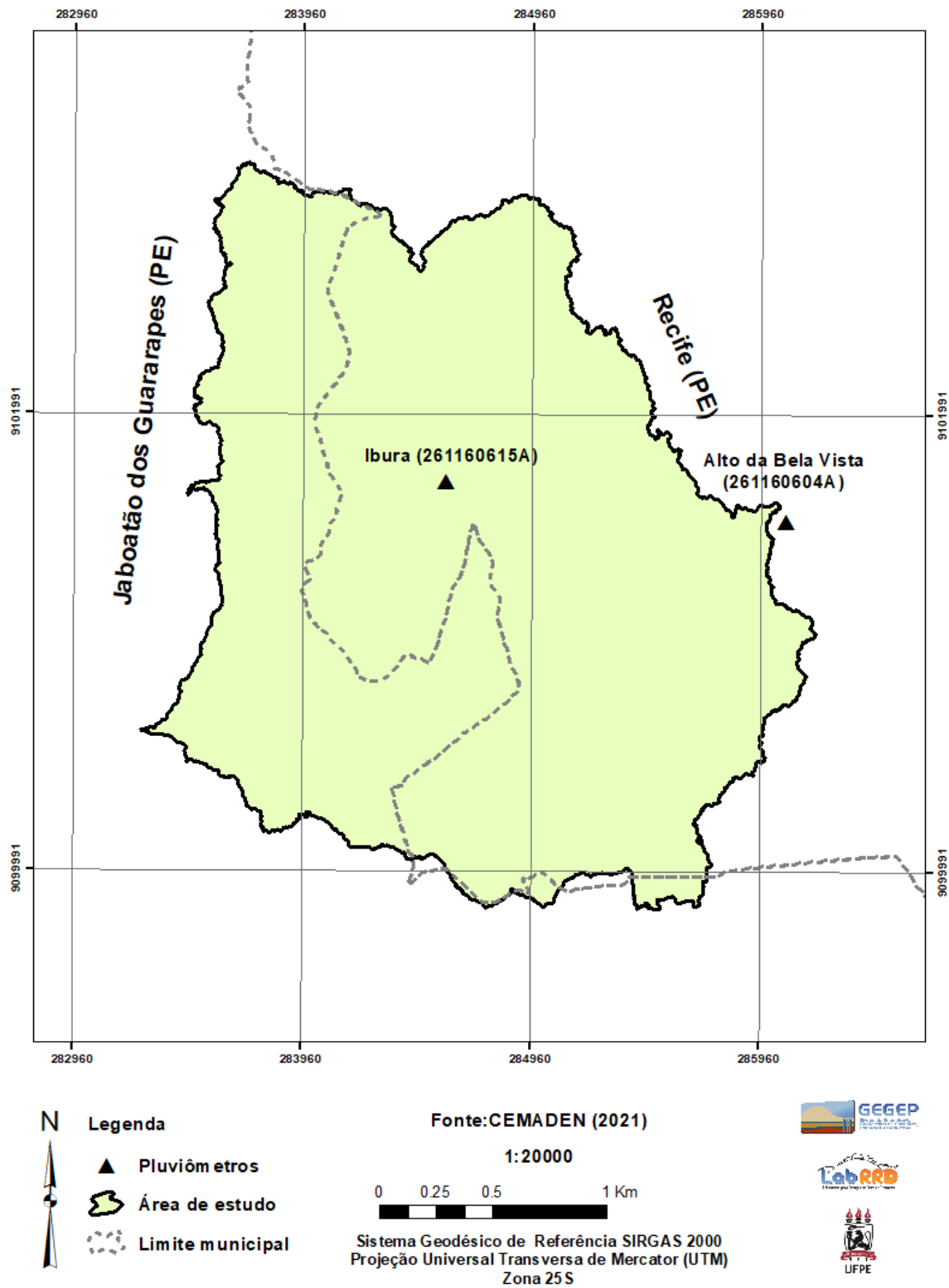
Segundo dados do [climate-data.org](https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pe/Recife-5069/)¹, coletados entre os anos de 1999 a 2019, a temperatura média anual da cidade do Recife é 25,7 °C e a pluviosidade média anual acima de 1.000 mm. Os dados referentes a Jaboatão dos Guararapes são similares aos de Recife, apresentando uma temperatura média anual de 25,4 °C e uma pluviosidade média anual acima de 1.000 mm. Essas informações enquadram o clima de ambos os municípios como Aw - clima de savana tropical, segundo o sistema de classificação climática de Köppen-Geiger.

A análise de três municípios da RMR (Camaragibe, Recife e Jaboatão dos Guararapes), realizada por Bandeira (2010) concluiu que o período chuvoso dessa região está concentrado entre os meses de março e agosto, com médias mensais maiores que 150 mm, podendo atingir no mês de junho médias superiores a 350 mm, sendo esse o período considerado de alerta para a Defesa Civil. Já o intervalo entre setembro e fevereiro é considerado, em média, de baixa precipitação pluviométrica.

O mapa exibido na Figura 20 apresenta a posição de dois pluviômetros automáticos do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), em relação a área de estudo. O pluviômetro Ibura (código: 261160615A) encontra-se localizado dentro da área de estudo, enquanto que o pluviômetro Alto da Bela Vista (código: 261160604A) está instalado fora da área de estudo, porém devido à sua proximidade, os dados aferidos por este também são considerados nas seguintes análises.

¹ Informações disponíveis em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pe/Recife-5069/>. Acesso em: 15 de set. de 2020.

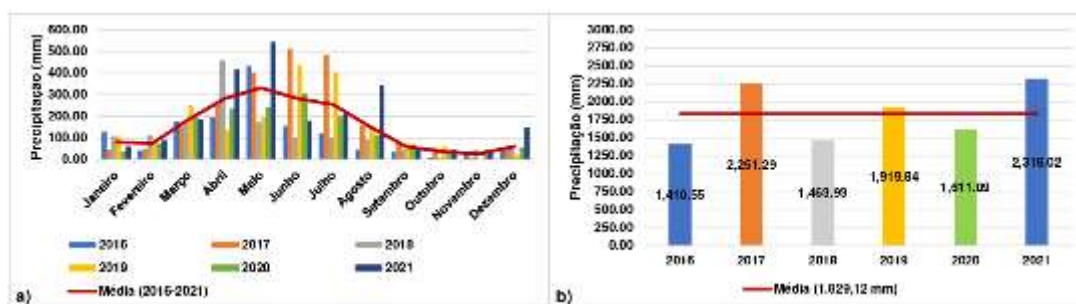
Figura 20 - Posição dos pluviômetros automáticos do CEMADEN em relação a área de estudo.



Fonte: GEGEP (2022).

A Figura 21 e a Tabela 17 apresenta as precipitações mensais e anuais ocorridas na área de estudo no período de 2016 a 2021 registradas pelo pluviômetro Ibura. O pluviômetro está localizado nas seguintes coordenadas em UTM: 286070,00 mE em longitude e 9101527,00 mS em latitude na zona 25S. Destaca-se que os dados pluviométricos apresentados foram disponibilizados pelo CEMADEM.

Figura 21 - Precipitações: (a) mensais e (b) anuais registradas no período de 2016 a 2021 e a média do período (pluviômetro Ibura).



Fonte: GEGEP (2022).

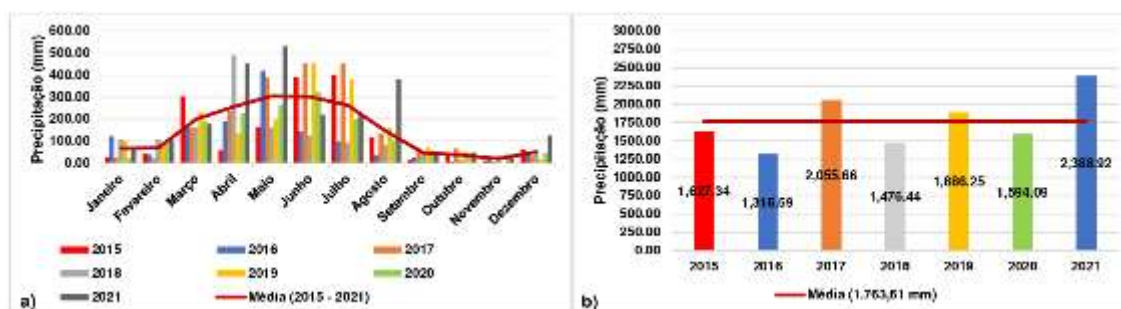
Tabela 17 - Precipitações mensais e anuais do pluviômetro Ibura (período de 2016 a 2021).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2016	128	41	176	196	433	154	121	46	35	11	27	42	1.411
2017	46	51	147	251	403	513	485	159	83	58	10	47	2.251
2018	107	114	163	459	173	104	100	93	45	10	43	52	1.464
2019	107	79	248	136	192	439	403	157	73	61	1	23	1.920
2020	38	77	193	237	242	305	201	115	70	29	50	56	1.611
2021	61	89	187	416	544	180	216	345	55	49	27	148	2.318
Méd	81	75	186	283	331	283	254	152	60	36	26	61	1.829

Fonte: GEGEP (2022).

A Figura 22 e a Tabela 14 apresenta as precipitações mensais e anuais ocorridas na área de estudo no período de 2015 a 2021, registradas pelo pluviômetro Alto da Bela Vista. O pluviômetro está localizado nas seguintes coordenadas em UTM: 284584,00 mE em longitude e 9101695,00 mS em latitude na zona 25S.

Figura 22 - Precipitações: (a) mensais e (b) anuais registradas no período de 2015 a 2021 e a média do período (pluviômetro Alto da Bela Vista).



Fonte: GEGEP (2022).

Tabela 18 - Precipitações mensais e anuais do pluviômetro Alto da Bela Vista (período de 2015 a 2021).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2015	28	41	303	58	165	392	399	117	14	35	12	63	1,627
2016	122	40	171	191	421	143	100	38	25	10	20	34	1,317
2017	27	21	159	239	391	454	454	137	67	67	8	32	2,056
2018	109	108	165	490	159	125	93	84	51	15	35	43	1,476
2019	102	83	231	135	199	452	382	162	68	55	2	15	1,886
2020	22	88	191	229	265	323	197	105	57	29	42	46	1,594
2021	60	104	178	451	532	220	218	381	47	49	23	124	2,389
Méd	67	69	200	256	305	301	263	146	47	37	20	51	1,764

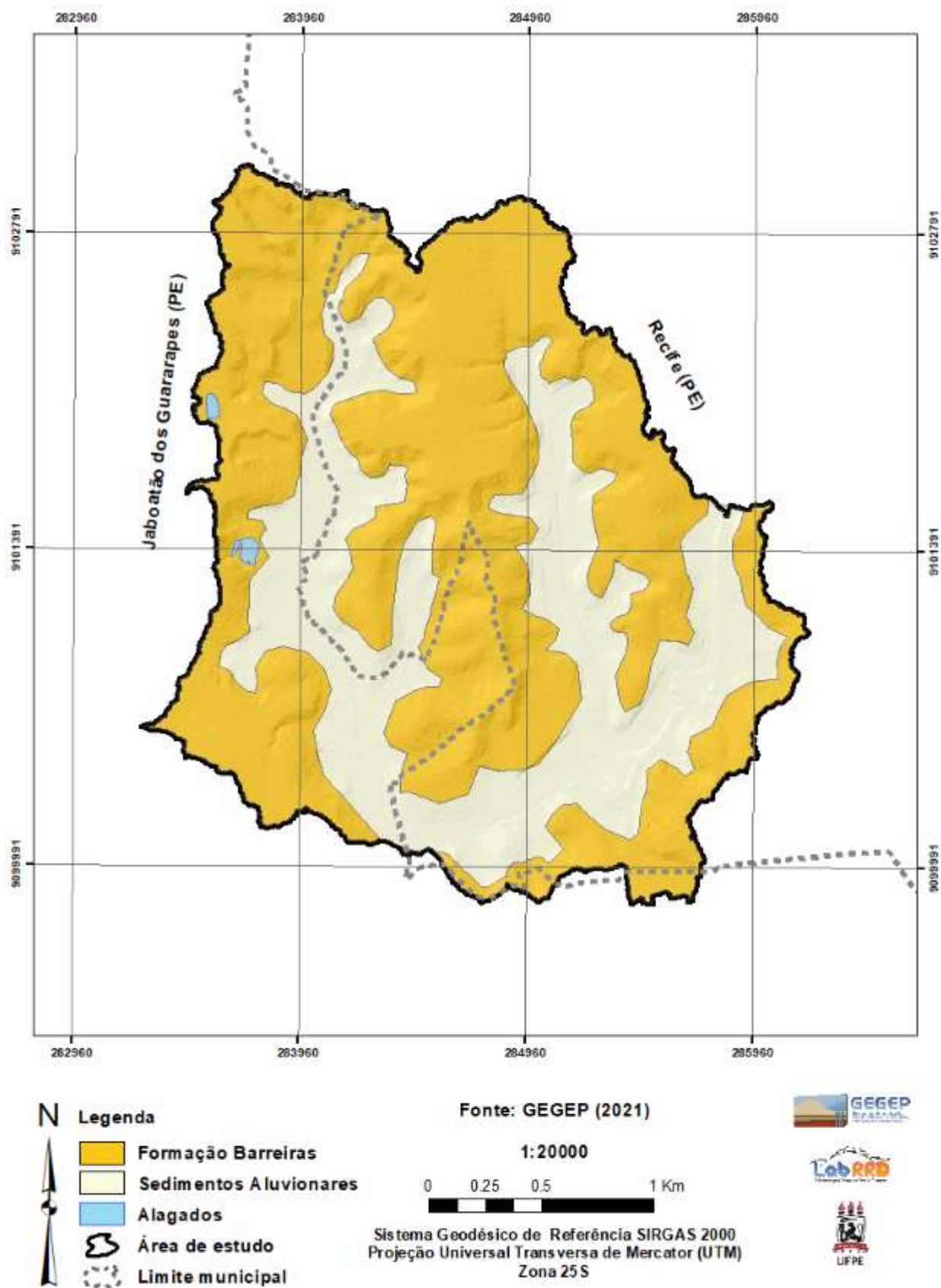
Fonte: GEGEP (2022).

Os dados foram coerentes com os dados encontrados na literatura em relação a pluviometria da região, pois verifica-se que em ambos os pluviômetros, o período chuvoso está concentrado nos meses de março a agosto, com médias mensais geralmente maiores que 150 mm. Também como previsto na bibliografia a maior média de precipitação ocorre no mês de junho e o período mais seco se estende de setembro a fevereiro.

4.1.2 Aspectos Geológicos

O mapa com as principais unidades geológicas identificadas na área de estudo é apresentado na Figura 23. Através da análise do mapa é possível identificar a existência de duas unidades geológicas distintas, a Formação Barreiras que aflora em posições mais elevadas e a presença de sedimentos aluvionares em áreas planas localizadas no fundo dos vales.

Figura 23 - Mapa geológico da área de estudo.

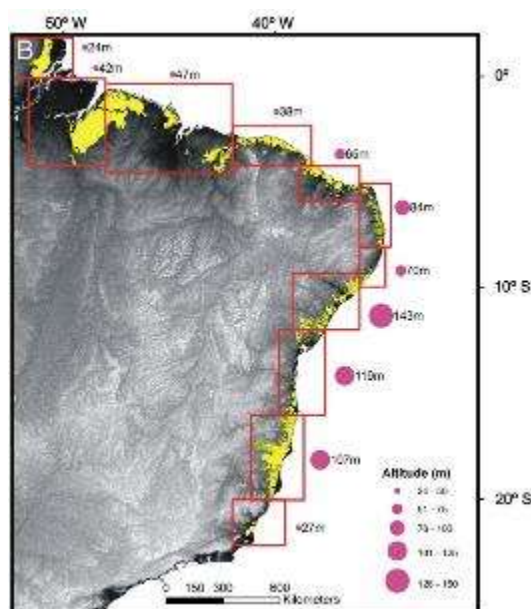


Fonte: GEGEP (2022).

Os sedimentos aluvionares correspondem às superfícies baixas e planas, limitadas pelas unidades vertentes, onde predominam os processos de deposição. Os solos encontrados nessa unidade são os aluviais, formados a partir da deposição de sedimentos fluviais não consolidados de natureza e granulometria variadas (PFALTZGRAFF, 2003).

Segundo Coutinho e Severo (2009), a Formação Barreiras é uma unidade geológica de expressão continental, de grande ocorrência no litoral brasileiro, estendendo-se desde a Foz do Amazonas até o Rio de Janeiro, conforme o apresentado na Figura 24. De acordo com Alheiros et al. (1998), esta unidade teve sua deposição associada à eventos cenozóicos de natureza climática e/ou tectônica, que permitiram, durante o final do Terciário (Plioceno), o extenso recobrimento das superfícies expostas do embasamento e das Bacias Cretáceas, colmatando o relevo existente.

Figura 24 - Distribuição da Formação Barreiras ao longo da costa brasileira, com suas respectivas altitudes.



Fonte: Rossetti, Bezerra e Dominguez (2013).

A Formação Barreiras possui coloração viva variando desde vermelhas, amarelas até brancas, dependendo da intensidade da oxidação do ferro (ALHEIROS, FERREIRA, 1991; MEIRA, 2008; BANDEIRA, 2010). É litologicamente composta por sedimentos areno-argilosos, pouco consolidados, especificadamente areias quartzosas, intercaladas por estratos rítmicos de areia fina e/ou argila, bastante friáveis e facilmente erodíveis (PFALTZGRAFF, 2003; COUTINHO, SEVERO, 2009).

A Formação Barreiras, quando relacionada a processos fluviais, apresenta três sistemas deposicionais distintos, denominados fácies, elas são: leque aluvial proximal, leque distal/planície aluvial e canal fluvial (ALHEIROS et al., 1988). De acordo com Meira (2008), Coutinho e Severo (2009) e Bandeira et al. (2010), esses sistemas são diferenciados da seguinte forma:

O sistema deposicional de leque aluvial proximal é desenvolvido sob um regime de fluxos de alta energia, capaz de tracionar e depositar seixos e outros materiais provenientes dos solos do embasamento cristalino, devido a isso seus sedimentos apresentam má seleção granulométrica e granulação grossa, geralmente composta por grãos de areia;

O leque distal/planície aluvial apresenta estratificação horizontal com intercalação de camadas arenosas e argilosas, decantadas durante os períodos de menor energia do fluxo fluvial, nas partes mais baixas do relevo da época. Essa alternância argila/areia pode ser desfavorável à estabilidade das encostas: quanto o topo do talude é argiloso, devido as propriedades granulométricas da argila, menor será a suscetibilidade a erosão, entretanto, em taludes de topo arenoso, devido a facilitação do processo de infiltração de água, esses possuem maior suscetibilidade a erosão e a deslizamento.

A fácies do tipo canal fluvial foi formada sob regimes de fluxo de alta energia com transporte de areias e cascalhos por tração, e de finos por suspensão. Apresenta coloração creme com zonas esbranquiçadas devido o mosqueamento do perfil com manchas avermelhadas em decorrência do intemperismo do óxido de ferro. É caracterizada por ser de granulometria predominantemente arenosa e bem susceptível a processos erosivos. Na área de estudo foi identificado predominância da fácies do tipo canal fluvial conforme o definido por estudos prévios: Santana (2006), Meira (2018), Coutinho et al. (2017), Santos (2018).

4.1.3 Aspectos Geomorfológicos

A Geomorfologia é a ciência que estuda as formas de relevo, sua gênese, composição (materiais) e os processos que nele atuam (FLORENZANO, 2008). O relevo constitui a expressão espacial da superfície terrestre e é o produto da interação entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera, por meio de processos de troca de

energia e matéria que se desenvolvem no tempo e no espaço (FORNASARI FILHO; FARIA, 2018).

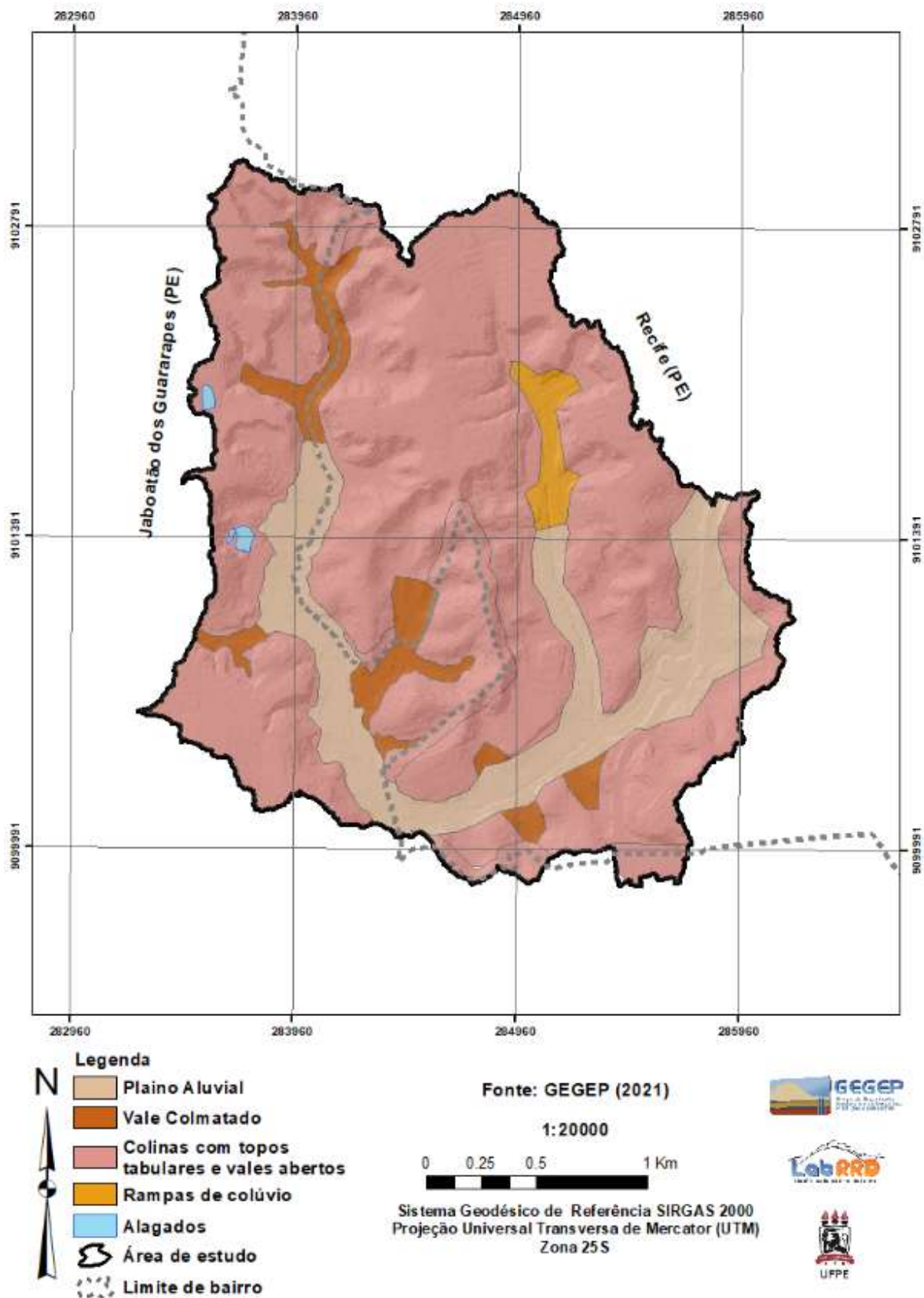
De acordo com Young (1972) apud Eloarza (2008), a maior parte da superfície terrestre é formada por encostas, estas são consideradas componentes fundamentais do relevo. Cendrero e Dramis (1996), com base em estudos realizados na Europa, concluem que os movimentos de massa são em alguns casos o principal processo de evolução do relevo. No entanto, estes são perigosos e podem afetar a vida e propriedades humanas, tornando-se o foco de preocupação para engenheiros geotécnicos e engenheiros geológicos (BROMHEAD, 1992). Nesse contexto, a geomorfologia trata-se de uma ferramenta auxiliar no processo de entendimento dos deslizamentos, porém de uma perspectiva externa (ELOARZA, 2008).

A Figura 25 apresenta o mapa geomorfológico da área de estudo. Nesse é possível identificar quatro unidade de relevo, sendo elas: plaino aluvial; vale colmatado; colinas com topos tabulares e vales abertos e rampa de colúvio. De acordo com os conceitos apresentados pelo IBGE (2009):

Os plainos aluviais são áreas planas resultante de acumulação fluvial sujeita a inundações periódicas, possuem declividade predominantemente plana, ou seja, menor que 3° . Os vales colmatados apresentam declividade variando entre plana ($< 2^\circ$) e muito fraca ($3^\circ - 7^\circ$). Apresenta duas formas básicas, o formato mais estreito com pouca acumulação de sedimentos em forma de “V” e os vales do tipo aberto que apresentam dimensão mais ampla e fundo achatado formado a partir do entulhamento de sedimentos de origem coluvial/aluvial.

As colinas com topos arredondados e vales côncavos apresentam altimetria variando entre 20 e 70 metros, com declividade entre 11° a 17° . Possuem topo arredondado, geralmente individualizados por vales côncavos entulhados de sedimentos. As rampas de colúvio tratam-se de fundo de vale suavemente inclinadas, com declividade variando entre fraca ($7^\circ - 11^\circ$) e média ($11^\circ - 17^\circ$) associadas à coalescência de depósitos coluviais. Ocorre em setores de baixa encosta, em segmentos côncavos que caracterizam as reentrâncias ou depressões do relevo nos anfiteatros.

Figura 25 - Mapa geomorfológico da área de estudo.



Fonte: GEGEP (2022).

As curvas de nível apresentadas na

Figura 26, mostram que a área é constituída por interflúvios de topos planos intercalados por estreitas planícies aluviais, conforme descrito por Girão (2007). De acordo com Coutinho et al. (2017), o relevo predominante é classificado como vales largos do tipo anfiteatro, apresentando também em menor escala vales estreitos do tipo ravina. Os anfiteatros identificados estão intercalados com espinhaços do tipo garupa, esporões e espigões.

As cabeceiras de drenagem na forma de anfiteatro representam zonas côncavas responsáveis por concentrar água em um determinado ponto, potencializando o poder destrutivo da água nesse local (VIDAL-TORRADO; LEPSCH; CASTRO, 2005; PFALTZGRAFF, 2007). Os espinhaços normalmente tem formas topográficas convexas que provocam a dispersão radial das águas de escoamento superficial, os do tipo garupa por definição apresentam divisor de águas mal definido ao contrário dos espigões.

A Figura 27, apresenta o mapa de inclinação da área de estudo categorizada de acordo com a classificação apresentada na Tabela 19.

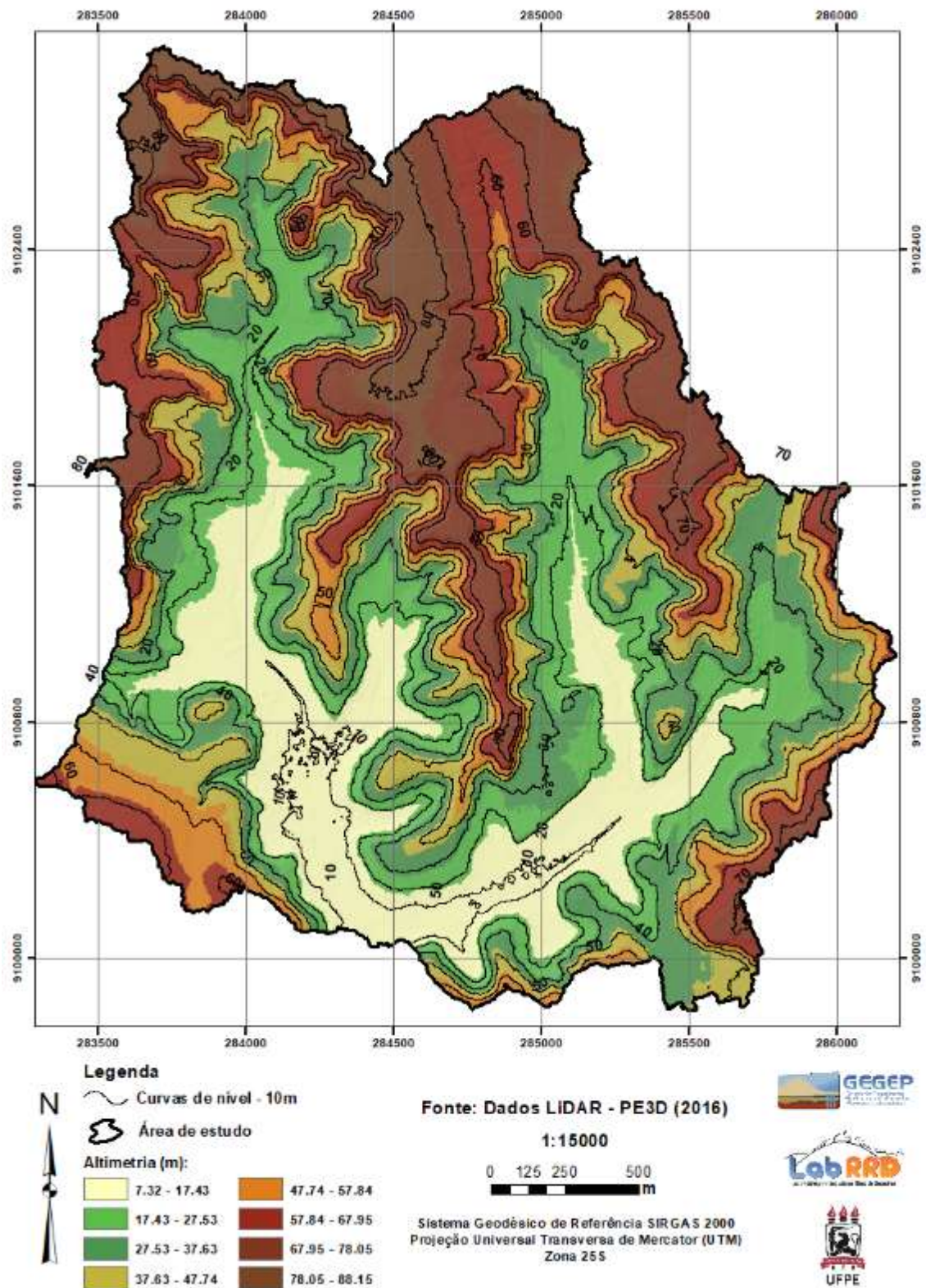
Tabela 19 - Classes de declividade.

Declividade	Intervalo (°)
Plana	0 - 3
Muito fraca	3 - 7
Fraca	7 - 11
Média	11 - 17
Forte	17 - 27
Muito forte	> 27

Fonte: IPT (2002).

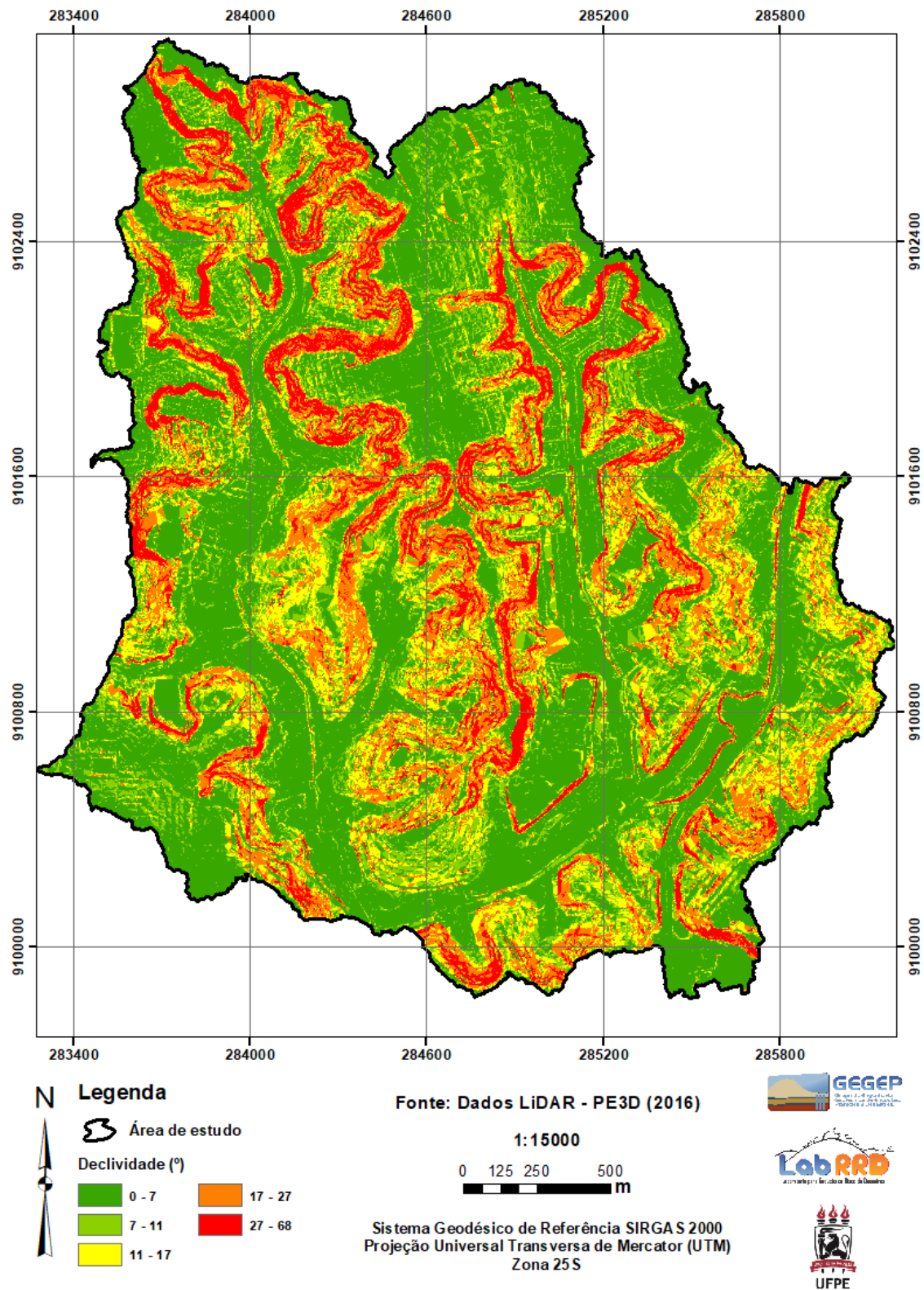
Nessa classificação 46,87% da área de estudo pode ser considerada variando entre a declividade catalogada como 'plana' e 'muito fraca'; 14,76% é considerado relevo de declividade 'fraca'; 13,85% é classificado como relevo de declividade média tratando-se de uma área de transição entre as áreas mais planas e inclinadas; 14,49% representa a área de declividade forte. Por último, 10,03% é considerada área de declividade muito forte.

Figura 26 - Mapa altimétrico da área de estudo com curvas de nível.



Fonte: GEGEP (2022).

Figura 27 - Mapa de declividade da área de estudo.



Fonte: O Autor (2022).

4.1.4 Mapeamento de risco na área de estudo

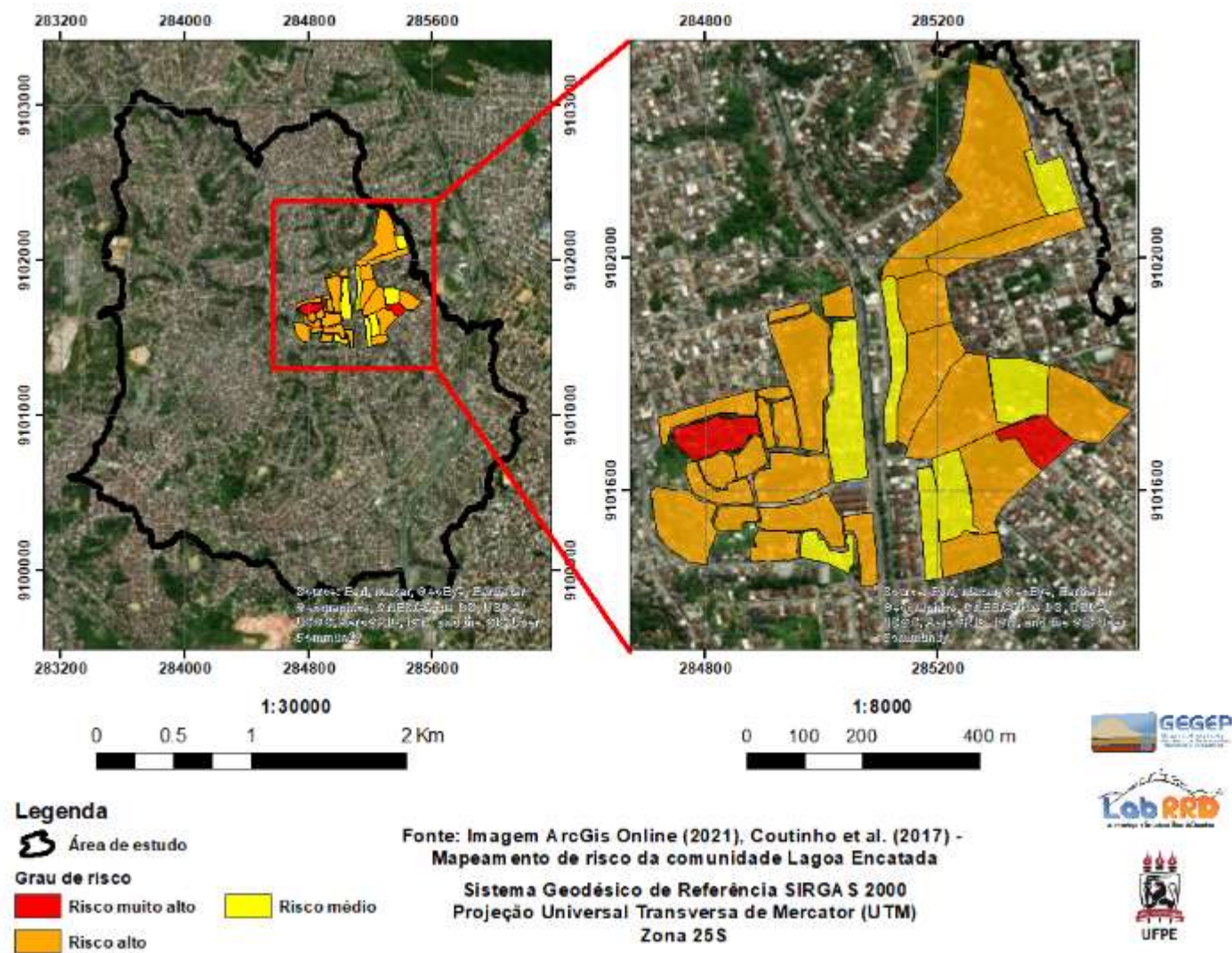
O processo de ocupação do Recife a partir de 1940, foi embasado por ações degradantes que levaram ao desequilíbrio da dinâmica do ambiente físico-natural e mesmo socioeconômico (GIRÃO, 2007). A incompatibilidade entre as técnicas de ocupação urbana e as características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas dos terrenos originam as trágicas ocorrências das áreas de risco (SANTOS, 2012; ROCHA; SCHULER, 2016).

Áreas de risco são locais sujeitos à ocorrência de fenômenos de natureza hidráulica e geológico-geotécnica que possam resultar em perda de vidas e/ou danos materiais. Preponderantemente, estes locais estão associados a ocupações irregulares em encostas de alta declividade e ou fundos de vales, carentes de infraestrutura urbana, suscetíveis a movimentos de massa ou a inundações e solapamentos respectivamente (FIGUEIREDO, 1994).

Para o mapeamento de risco da comunidade Lagoa Encantada, desenvolvido por Coutinho et al. (2017), foram delimitados 33 subsetores de risco a movimento de massa, que resulta em uma área de 0,40 km² aproximadamente. Desse total, 7 subsetores foram classificados como de 'risco médio', o que corresponde a 21% do total; 24 subsetores foram classificados como 'risco alto', o que equivale a 73% do total e 2 subsetores foram classificados como de 'risco muito alto', representando 6% do total. Segundo os autores, a composição final do grau de risco apresentou equilíbrio entre o grau de suscetibilidade e o grau de vulnerabilidade. Entretanto, o grau de suscetibilidade teve um peso ligeiramente maior do que o grau de vulnerabilidade. A Figura 28 apresenta o mapa de risco para cada subsetor estudado.

O mapa de risco, exibido na Figura 28, mostra que a área de estudo possui muitos setores classificados com grau de risco alto a muito alto a deslizamentos. Este fato reforça a importância da realização de estudos de cunho geológico-geotécnicos mais aprofundados na área, afim de entender os mecanismos e fatores que desencadearam ou podem desencadear a ocorrência movimentos de massa nessa região.

Figura 28 - Mapa de Risco a deslizamento para Comunidade de Lagoa Encantada, bairro COHAB, município Recife – PE.

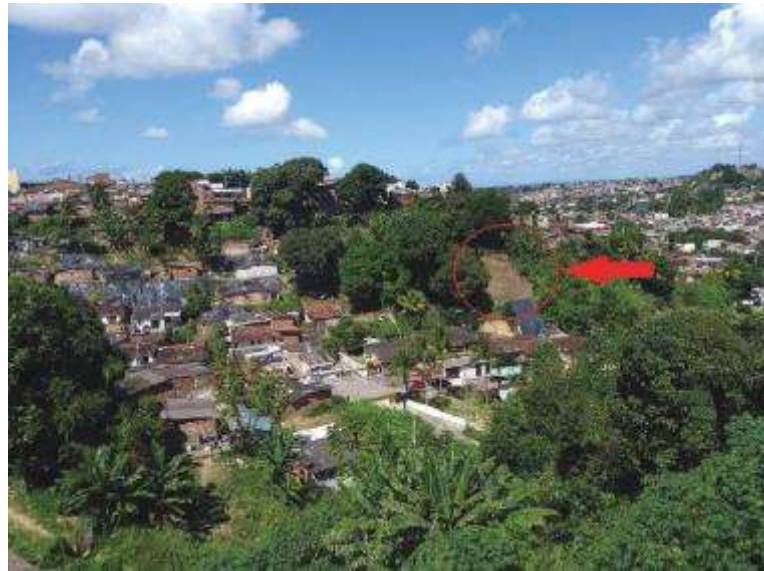


Fonte: Adaptado de Coutinho et al. (2017).

4.2 HISTÓRICO DE DESLIZAMENTO NA ÁREA DE ESTUDO

A atual área de estudo frequentemente chama a atenção da imprensa, principalmente em períodos chuvosos, devido a ocorrência de movimentos de massa que geralmente estão associados a perdas econômicas e humanas. Segundo Santos (2018) nessa região é possível observar diversas cicatrizes de deslizamentos planares que ocorrem ao longo das encostas. A Figura 29 mostra a cicatriz de um deslizamento translacional na rua Dr. Paulo de BÍase no bairro COHAB, Recife-PE.

Figura 29 – Cicatriz de deslizamento planar na rua Dr. Paulo de BÍase, Recife-PE.



Fonte: Santos (2018).

As casas localizadas no topo das encostas da área de estudo, regularmente apresentam trincas e fissuras, isso indica que tais encostas apresentam movimentações que podem se desenvolver e acarretar deslizamentos. Em 2018, a encosta da 1ª travessa Soldado Virgílio Lúcio, COHAB, apresentou sinais de movimentação, causando trincas e fissuras nas casas localizadas no seu topo, além de ameaçar uma escola no pé da encosta.

Figura 30 – Deslizamento na localidade Pantanal, COHAB, em 24/07/19: a) e b) Encosta; c) e d) Trincas e fissuras nas paredes da residência localizada no topo da encosta.



Fonte: Descaso... (2018)

Na rua São Xavier, no bairro COHAB, em Recife-PE, uma encosta deslizou devido as fortes chuvas do dia 13/06/19 que acumulou em 24h, de acordo com o pluviômetro Ibura, 161,53mm. Tal ocorrência impossibilitou o tráfego de pedestres e veículos, pois destruiu a via pública. A Figura 31 apresenta imagens do deslizamento e evidencia a presença de blocos que indicam a possibilidade de novas ocorrências e a necessidade de reparos. Nesse mesmo dia, ocorrência similar foi registrada na rua Professor Manoel Bandeira, no bairro COHAB, em Recife – PE.

Figura 31 - Deslizamento na rua São Xavier: a) Imagem do deslizamento; b) Detalhe da ruptura e indicação da formação de blocos.



Fonte: Chuvas... (2019).

Na localidade Pantanal, na COHAB, Recife-PE, em 24 de julho 2019, os moradores registraram um deslizamento desencadeado por precipitações intensas, que acumulou em 72h, segundo o pluviômetro Ibura, 156,29 mm. O material deslizado atingiu uma residência destruindo-a completamente. A Figura 32 apresenta imagens do deslizamento, por meio delas é possível observar a ruptura do tipo planar. No dia 13/06/19, ocorrência similar foi registrada na travessa da rua São João, na comunidade Lagoa Encantada, em Recife – PE.

Figura 32 – Deslizamento na localidade Pantanal, COHAB, em 24/07/19: a) Ruptura; b) Destruição da residência atingida.



Fonte: Deslizamento... (2019)

Em 13 de junho 2019, na rua Rua Alto Santa Izabel, localidade Monte Verde, em Jaboatão dos Guararapes, a forte chuva causou um deslizamento que atingiu uma residência, resultando em uma vítima fatal e quatro pessoas feridas. Segundo a Defesa Civil de Jaboatão dos Guararapes, a encosta deslizada apresentava risco geológico muito alto e possuía histórico de deslizamento. A Figura 33 apresenta imagens registradas após o deslizamento, por meio delas é possível observar a destruição total da residência atingida.

Figura 33 – Deslizamento na rua Alto Santa Izabel em 13/06/19.



Fonte: Defesa Civil de Jaboatão dos Guararapes.

Em Junho de 2020, a mídia televisiva, registrou que as chuvas desse mês desencadeou novos deslizamentos, expondo assim a fragilidade da área. Esse mês registrou no pluviômetro Ibura, 304,84 mm, sendo o mais chuvoso do ano. A Figura 34 mostra em detalhe o registro de um pequeno deslizamento que ameaçou as residências localizadas na base da encosta.

Figura 34 - Deslizamento na rua Alto Santa Izabel em junho de 2020.



Fonte: Moradores... (2020).

Em 14 de maio de 2021, na avenida Chapada do Araripe, também na localidade Monte Verde, em Jaboatão dos Guararapes, uma encosta deslizou, após fortes chuvas, atingindo uma residência e ferindo uma mulher de 35 anos. O pluviômetro Ibura, registrou em 48h um acumulado de 255.56 mm, indicando a relação entre as ocorrências de movimentos de massa com eventos pluviométricos. A Figura 35 apresenta imagens do deslizamento e indica uma ruptura do tipo planar.

Figura 35 - Deslizamento na avenida Chapada do Araripe em maio de 2021.



Fonte: Albuquerque (2021).

As ocorrências apresentadas demonstram a vinculação entre as ocorrências de movimentos de massa com eventos pluviométricos. Além disso, as imagens dos deslizamentos que aconteceram na área mostram que estes possuem as características de deslizamentos translacionais, concordando com Gusmão Filho (1997), que observou que na Região Metropolitana de Recife (RMR) a maioria dos deslizamentos são rasos e suas superfícies de ruptura são translacionais (planares) e paralelas ao talude.

A relação entre os índices pluviométricos e a ocorrência de instabilização, trata-se de uma informação essencial para a delimitação das condições de contorno do local investigado (AUGUSTO FILHO; VIRGILLI; DILÁSCIO, 2018). Dados de ocorrência do ano de 2009, analisados por Bandeira (2010), expõem que a área de estudo dessa dissertação se encontra nas regiões dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes onde foram registrados os maiores números de ocorrências. A região Sul do município de Recife, apresentou 234 ocorrências, ficando atrás apenas da Região Norte. A regional de Cavaleiro do município de Jaboatão dos Guararapes, apresentou 143 ocorrências, sendo superada apenas pelos registros da regional de Jaboatão Centro. Das localidades da regional de Cavaleiro, os bairros Zumbi do Pacheco e Dois Carneiros registraram 20 e 28 ocorrências respectivamente.

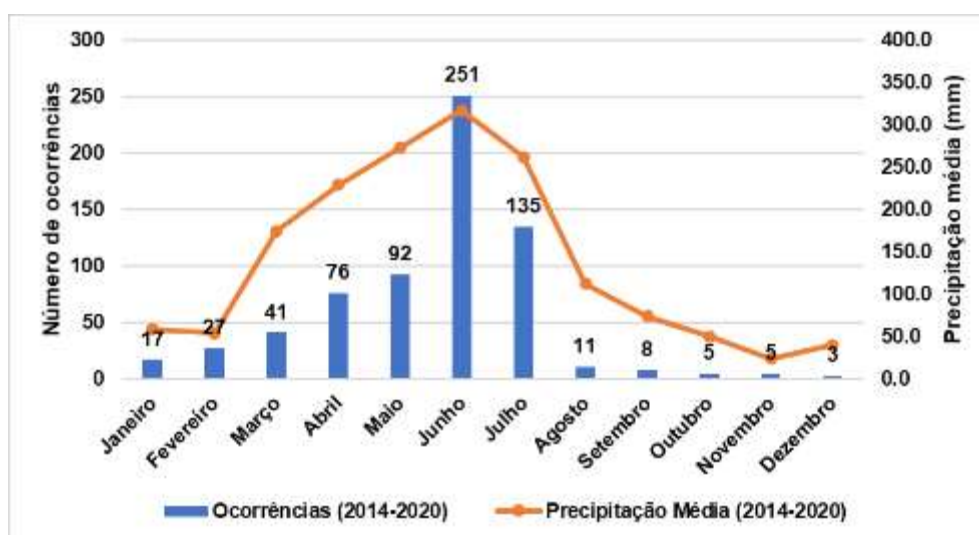
A fim de elaborar um registro de ocorrência de deslizamentos, nesse item serão apresentados os números e a localização dos registros feitos na área de estudo entre

os anos de 2014 e 2020, disponibilizados no formato de planilhas digitais pelas Defesas Civas dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Durante a análise das planilhas foram considerados ocorrências relacionadas a processos de instabilidade de encostas, geralmente denominadas como “Deslizamentos de Barreiras”. Foram catalogadas as seguintes informações: município, bairro, localidade e data da ocorrência. Em seguida, essas ocorrências foram relacionadas com os dados de pluviometria da região e comparada com as informações disponíveis na literatura.

O levantamento dos dados mostrou que no intervalo entre 2014 e 2020, foram registrados 671 deslizamentos na área de estudo. Através da análise do gráfico da Figura 36 observa-se que a maior frequência das ocorrências está concentrada no período entre março e julho, coincidindo com o período mais chuvoso da área, registrado pelo pluviômetro Alto da Bela Vista. O número de ocorrência nesse intervalo, corresponde a 88,67% do conjunto de dados analisados, sendo que 42,20% desse mesmo valor está concentrado apenas no mês de junho.

Figura 36 - Distribuição mensal do número de ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos médios entre os anos de 2014 a 2020 na área de estudo.

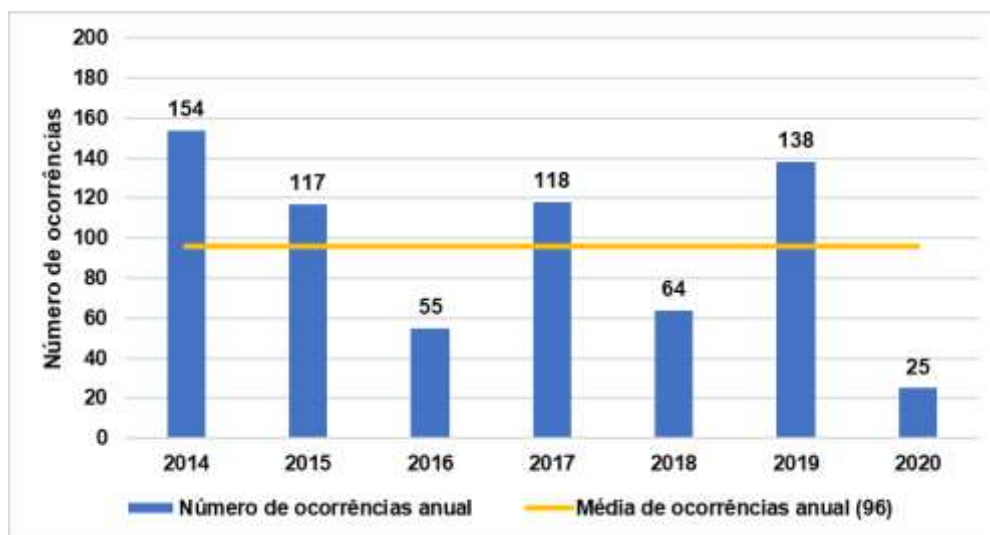


Fonte: O Autor (2022).

O registro das informações também permitiu distribuir as ocorrências de movimentos de massa anualmente, conforme o ilustrado na Figura 37. Os dados analisados mostram que o número médio de ocorrências anual, dentro do intervalo tempo analisado, corresponde a 96 deslizamentos por ano, dessa maneira os anos de 2016 e 2020 com base nessas informações ficaram abaixo da média de

ocorrências e representam 8% e 10% do número total de ocorrências respectivamente. Por sua vez, os anos de 2014, 2015, 2017 e 2019, ficaram acima da média, e representam 23%, 17%, 18%, 21% do número total de ocorrências respectivamente.

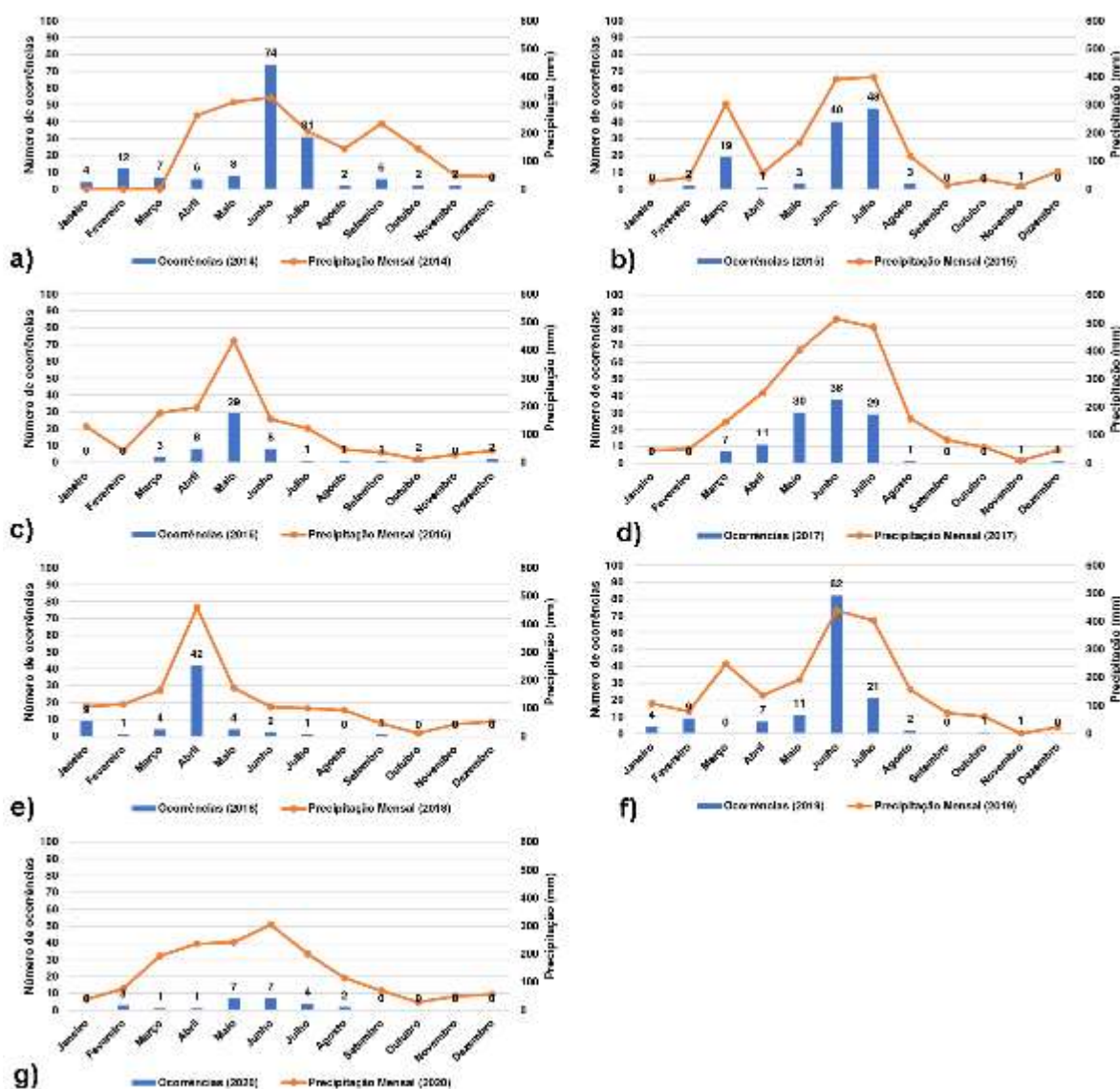
Figura 37 - Distribuição anual do número de ocorrências de deslizamentos de 2014 a 2020 na área de estudo.



Fonte: O Autor (2022).

A distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos de forma mensal para cada um dos anos analisados, conforme o apresentado na Figura 38, reforça a relação entre as ocorrências de deslizamentos com eventos pluviométricos. Destaca-se o número de ocorrências do mês de junho de 2014 e 2019 que correspondem respectivamente a 11,03% e 12,22% do registro total.

Figura 38 - Distribuição das ocorrências de deslizamentos e dados pluviométricos de forma mensal em: (a) 2014; (b) 2015; (c) 2016; (d) 2017; (e) 2018; (f) 2019; (g) 2020 na área de estudo.

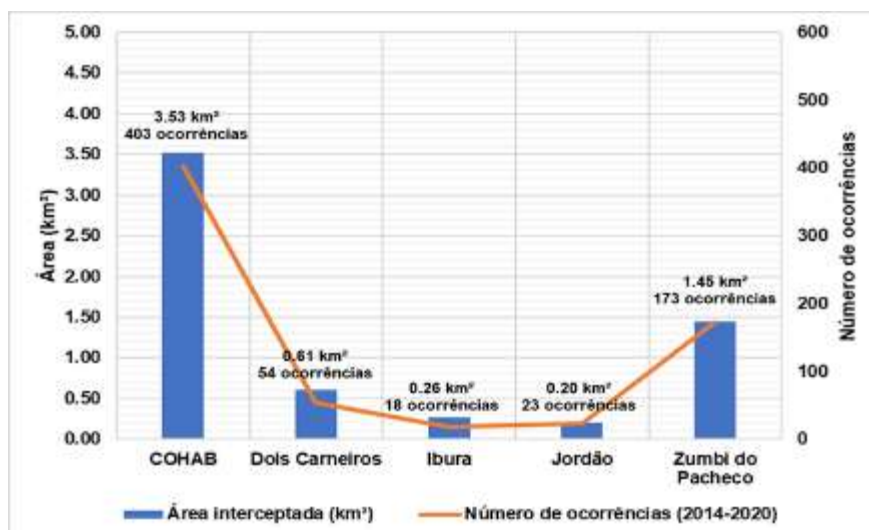


Fonte: O Autor (2022).

4.3 MAPA DE OCORRÊNCIAS DE DESLIZAMENTOS

As informações coletadas permitiram o mapeamento das ocorrências, possibilitando ter indicações sobre áreas mais susceptíveis aos processos. O levantamento do número de ocorrências de deslizamentos por bairro, entre os anos de 2014 e 2020, exibido na Figura 39, expõe que as regiões da COHAB e Zumbi do Pacheco, interceptadas pela área de estudo são os maiores focos de ocorrência.

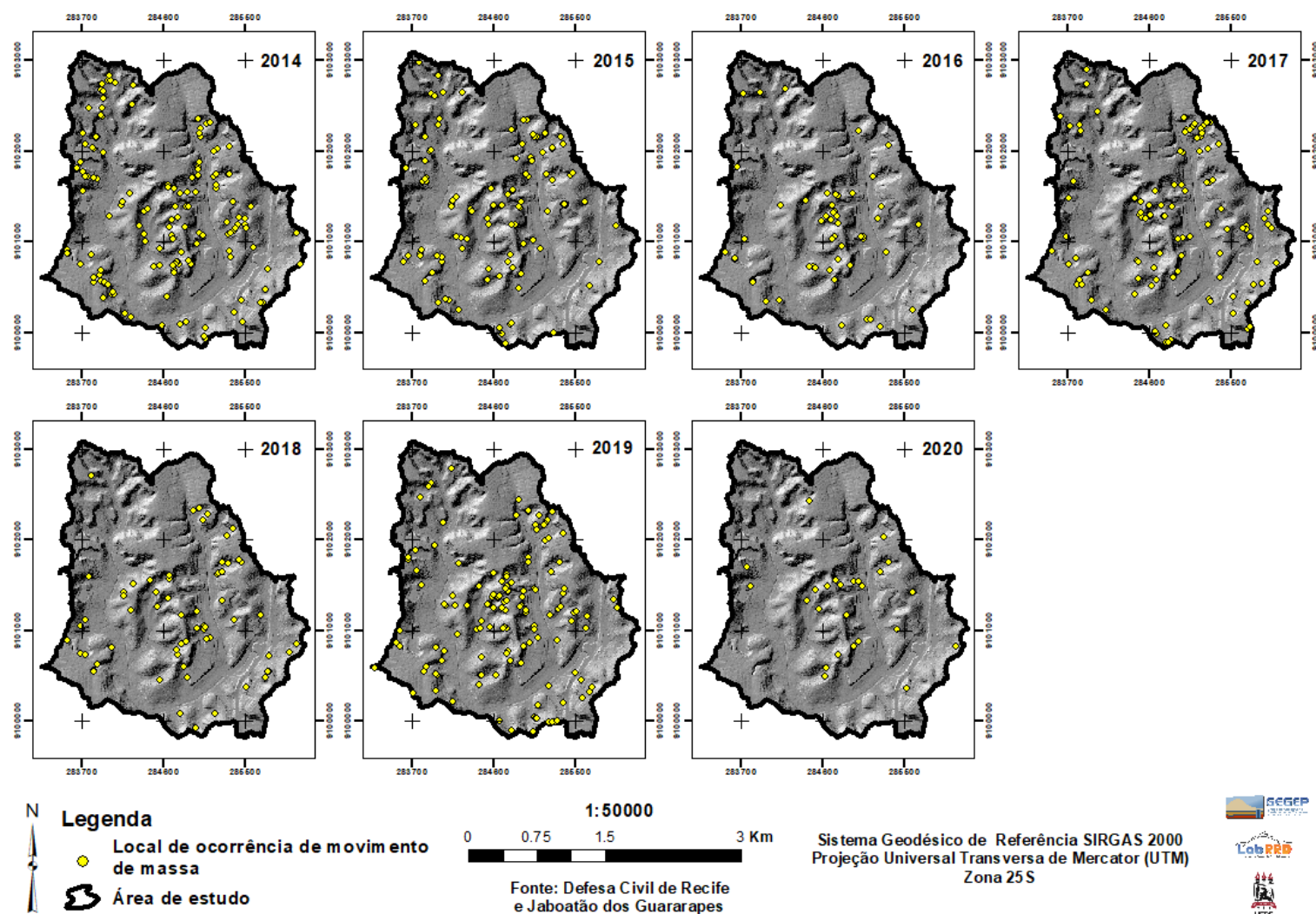
Figura 39 - Número de ocorrências de deslizamento por bairro interceptado pela área de estudo.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 40 apresenta o mapeamento anual das ocorrências para cada um dos anos analisados e mostra que existe uma tendência a ocorrência de movimentos de massa nos mesmos locais ou em regiões muito próximas ano após ano, apontando assim os locais mais frágeis da área de estudo.

Figura 40 - Mapeamento anual das ocorrências de deslizamento.



Fonte: O Autor (2022).

4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Conforme o apresentado nesse capítulo, a área de estudo desta pesquisa trata-se de uma bacia hidrográfica, com área aproximada de 6,16 km², abrangendo áreas dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes. A análise dos aspectos climáticos mostrou que em relação a pluviometria da região, o período chuvoso está concentrado nos meses de março a agosto, com médias mensais geralmente maiores que 150 mm. Também como indicado na bibliografia a maior média de precipitação ocorre no mês de junho e o período mais seco se estende de setembro a fevereiro.

No que se refere aos aspectos geológicos foi identificado a existência de duas unidades geológicas distintas, a Formação Barreiras que aflora em posições mais elevadas e a presença de sedimentos aluvionares em áreas planas localizadas no fundo dos vales. No concernente aos aspectos geomorfológicos foi identificado quatro unidades de relevo: o plano aluvial, o vale colmatado, as colinas com topos tabulares e vales abertos e a rampa de colúvio.

O mapeamento de risco mostrou que a área de estudo possui muitos setores classificados com grau de risco alto a muito alto aos movimentos de massa. Este fato reforça a importância da realização de estudos de cunho geológico-geotécnicos mais aprofundados nessa área.

O levantamento das ocorrências mostrou que no intervalo entre 2014 e 2020, foram registrados 671 deslizamentos na área de estudo. A maior frequência das ocorrências está concentrado no período entre março e julho, coincidindo com o período mais chuvoso da área. Esse fato reforça a relação entre as ocorrências de movimentos de massa com eventos pluviométricos.

5 METODOLOGIA DA CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE

Este capítulo se encontra dividido em duas partes. A primeira visa apresentar as metodologias utilizadas na investigação geológica-geotécnica. A segunda parte tem como objetivo apresentar as metodologias aplicadas no desenvolvimento das análises de suscetibilidade.

As metodologias utilizadas na investigação geológica-geotécnica foram realizadas em quatro etapas: coleta de informações prévias, investigação de campo, ensaios de laboratório e o estudo das Plataforma Geotécnica de Coleta de Dados (PCDs Geotécnicas).

No item referente as atividades em campo serão abordadas os métodos de investigação de subsuperfície empregadas nesse estudo, sumariamente sondagens do tipo SPT e trado; a determinação da condutividade hidráulica do solo por meio do Permeâmetro de Guelph; além de coletas de amostras deformadas e indeformadas para a realização dos ensaios de laboratório.

Em laboratório, a campanha de ensaios incluiu ensaios de caracterização física do solo, a determinação da resistência ao cisalhamento e a determinação da curva característica utilizando o método da mesa de tensão e do papel filtro.

Na seção referente as PCDs Geotécnicas será apresentada a metodologia de instalação e funcionamento dos equipamentos instalados na área de estudo, visando a realização de um monitoramento intensivo da variação da umidade do solo em decorrência da chuva. Por fim, na ultima seção será descrita a metodologia utilizada para a análise de suscetibilidade com o TRIGRS.

5.1 CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A Campanha de investigação geológico-geotécnica dessa dissertação está metodologicamente disposta em quatro etapas: coleta de informações prévias; ensaios de campo; ensaios de laboratório e o estudo das PCDs geotécnicas. Os materiais e métodos e os resultados alcançados em cada uma dessas etapas estão esquematizadas na Figura 41.

Figura 41 - Esquema das etapas da investigação geológico-geotécnica.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.1 Coleta de informações

A coleta de informações prévias de acordo com a ABNT NBR 11682 (2009), possui caráter obrigatório e visa obter informações básicas do local analisado como topografia, geologia e dados geotécnicos. Essas informações devem ser obtidas por meio de consultas a mapas geológicos, geomorfológicos, topográficos, além de cartas e mapas geotécnicos, fotos aéreas, imagens de satélite e levantamentos disponíveis, em conformidade com o que foi discutido e apresentado no Capítulo 4. Ressalta-se que as informações antecedentes de caráter geológico-geotécnicos foram obtidas por meio da consulta a estudos anteriores realizados pelo próprio GEGEP.

Conforme discutido no Capítulo 4, a área de estudo dessa dissertação registra com frequência a ocorrência de movimentos de massa. Segundo Santos (2018), através de visitas realizadas na região, é possível observar diversas cicatrizes de deslizamentos planares que ocorrem ao longo das encostas. Esses sinais indicam a fragilidade da região e a necessidade de realização de estudos nessa área.

Devido a essas características, a área se tornou alvo de diversas pesquisas realizadas pelo GEGEP/UFPE, constituindo, atualmente, uma das áreas de interesse da parceria firmada entre o GEGEP/CEMADEN. A Figura 42 mostra a localização dos estudos antecedentes realizados pelo GEGEP/UFPE e os estudos posteriores

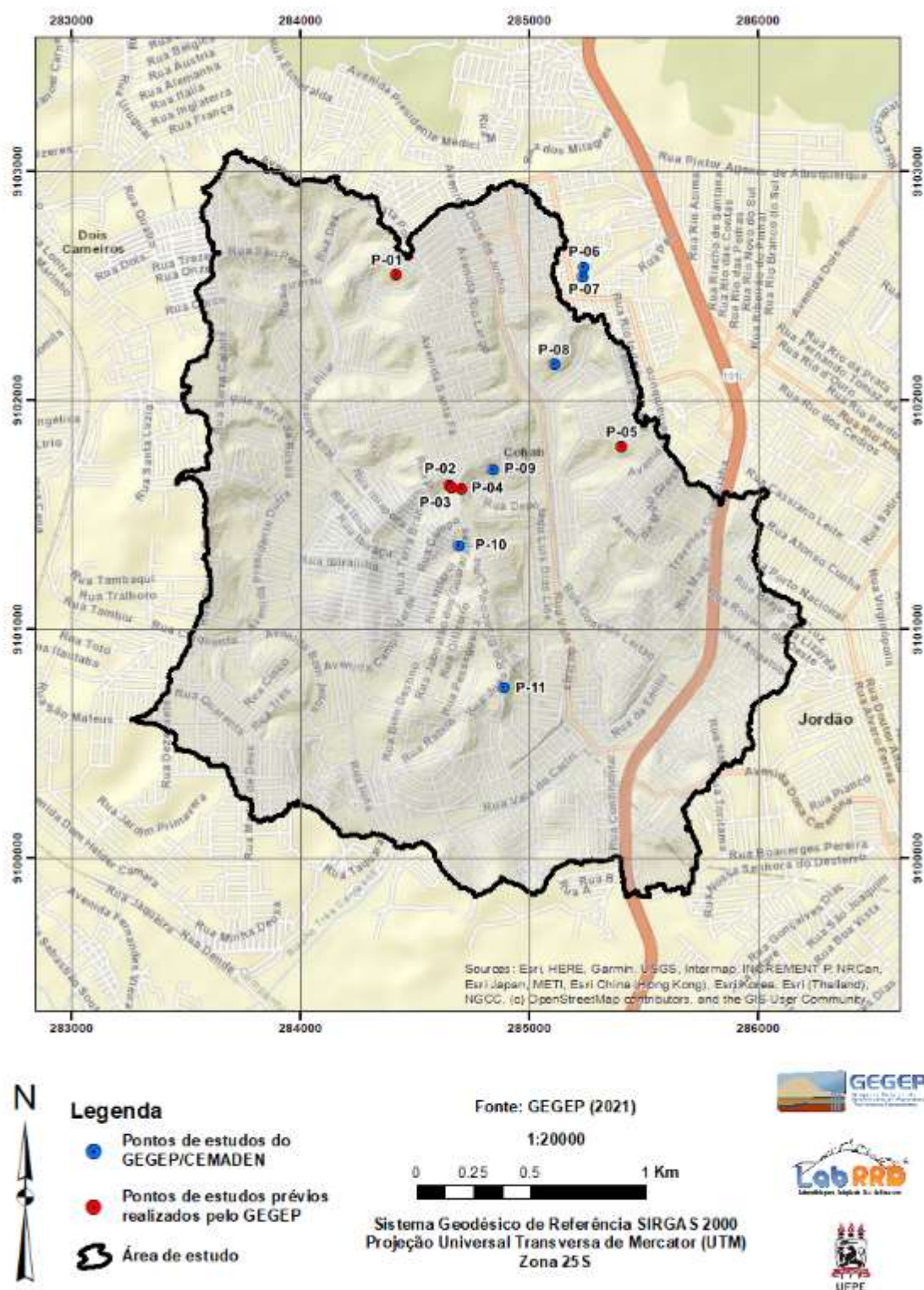
realizados pelo convênio GEGEP/CEMADEN. Os autores e a localização em UTM dos pontos de estudos apresentados no mapa da Figura 42 estão discriminados na Tabela 20.

Tabela 20 - Localização dos estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE e pelo GEGEP/CEMADEN.

Pontos de estudo	Autor(a)	Localização (UTM)	
		Longitude	Latitude
P-1	Santana (2006)	284425	9102547
P-2	Meira (2008)	284656	9101629
P-3	Meira (2008)	284668	9101618
P-4	Santos (2018)	284707	9101610
P-5	Santos (2018)	285410	9101797
P-6	GEGEP/CEMADEN (2021)	285241	9102583
P-7	GEGEP/CEMADEN (2021)	285240	9102540
P-8	GEGEP/CEMADEN (2021)	285119	9102159
P-9	GEGEP/CEMADEN (2021)	284845	9101694
P-10	GEGEP/CEMADEN (2021)	284696	9101364
P-11	GEGEP/CEMADEN (2021)	284895	9100743

Fonte: O Autor (2022).

Figura 42 - Localização dos pontos de estudos realizados pelo GEGEP/UFPE e GEGEP/CEMADEN.



Fonte: GEGEP (2022).

5.1.1.1 Estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE

Devido ao grande número de ocorrências de movimentos de massa a área de estudo se tornou alvo de diversas pesquisas realizadas pelo GEGEP/UFPE. A Tabela 21 mostra a síntese dos ensaios de campo realizados por esses estudos.

Tabela 21 - Ensaios de campo de estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE.

Pontos de estudo	Ensaios de Campo				
	Trado	SPT	Guelph	Coleta de amostras	
				Deformada	Indeformada
P-1	✓		✓	✓	✓
P-2	✓	✓	✓	✓	✓
P-3	✓	✓	✓	✓	✓
P-4		✓		✓	✓
P-5		✓		✓	✓

✓ ensaio realizado

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 22 apresenta de forma sumária os ensaios de laboratórios básicos executados por esses estudos promovidos pelo GEGEP/UFPE.

Tabela 22 - Ensaios de laboratório de estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE.

Pontos de estudo	Ensaios de Laboratório				
	Caracterização Física	Ensaio Edométrico	Cisalhamento Direto	TRI-FLEX	Curva Característica
P-1	✓		✓	✓	✓
P-2	✓	✓	✓	✓	✓
P-3	✓	✓	✓	✓	✓
P-4	✓	✓	✓	✓	✓
P-5	✓	✓	✓	✓	✓

✓ ensaio realizado

Fonte: O Autor (2022).

5.1.1.2 Estudos posteriores realizados pelo GEGEP/CEMADEN

Em virtude das particularidades da atual área de estudo, como: uma grande quantidade de ocorrências de movimentos de massa; o modo de ocupação; e a presença de setores de risco, está também se tornou um território de interesse do convênio GEGEP/CEMADEN. A Tabela 23 mostra a síntese dos ensaios de campo realizados por essa convênio em cada um dos pontos de estudo. A Tabela 24 apresenta o quantitativo dos ensaios realizados em campo.

Tabela 23 - Ensaios de campo de estudos posteriores realizados pelo GEGEP/CEMANDEN.

Pontos de estudos	Ensaios de Campo				
	Trado	SPT	Guelph	Coleta de amostras	
				Deformada	Indeformada
P-6	✓			✓	
P-7	✓			✓	✓
P-8	✓			✓	✓
P-9	✓			✓	✓
P-10	✓			✓	
P-11	✓	✓	✓	✓	✓

✓ ensaio realizado

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 24 - Quantitativo dos ensaios de campo realizados pelo GEGEP/CEMANDEN.

Ensaio de campo	Quantidade
Sondagem a trado manual	06
SPT	01
Coleta de amostra deformada	36
Coleta de amostra indeformada para determinação da curva característica	20
Coleta de amostra indeformada (bloco)	01
Permeâmetro de Guelph	01

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 25 apresenta de forma resumida os ensaios de laboratórios realizados pelo GEGEP/CEMANDEN. A Tabela 26 apresenta o quantitativo dos ensaios realizados em laboratório.

Tabela 25 - Ensaios de laboratório de estudos posteriores realizados pelo GEGEP/CEMANDEN.

Pontos de estudo	Ensaios de Laboratório				
	Caracterização Física	Ensaio Edométrico	Cisalhamento Direto	TRI-FLEX	Curva Característica
P-6	✓				
P-7	✓				✓
P-8	✓				✓
P-9	✓				✓
P-10	✓				
P-11	✓	✓	✓		✓

✓ ensaio realizado

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 26 - Quantitativo dos ensaios de laboratório realizados pelo GEGEP/CEMANDEN.

Ensaio de laboratório	Quantidade
Ensaio de caracterização	36
Ensaio de cisalhamento direto (Condição natural e inundado)	02
Ensaio edométrico (Condição natural e inundado)	02
Curva característica	20

Fonte: O Autor (2022).

5.1.1.3 Caracterização geológico-geotécnica do ponto P-11

Com o intuito de complementar as informações dos estudos prévios foi realizado uma investigação geológica-geotécnica mais detalhada no ponto P-11. Foram realizadas as seguintes atividades: coleta de amostra indeformada do tipo bloco, realização de sondagem SPT, determinação da condutividade hidráulica do solo por meio do permeâmetro de Guelph e ensaios de laboratório incluindo a definição de parâmetros de resistência e compressibilidade do solo. A Figura 43 mostra a localização dos ensaios realizados em campo no ponto P-11.

A quantificação dos ensaios realizados em campo e em laboratório estão dispostos nas Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 27 - Ensaio de campos realizados pelo GEGEP no ponto P-11.

Ensaio de campo	Quantidade
Sondagem a trado manual	01
SPT	01
Coleta de amostra deformada	06
Coleta de amostra indeformada para determinação da curva característica	05
Coleta de amostra indeformada (bloco)	01
Permeâmetro Guelph	01

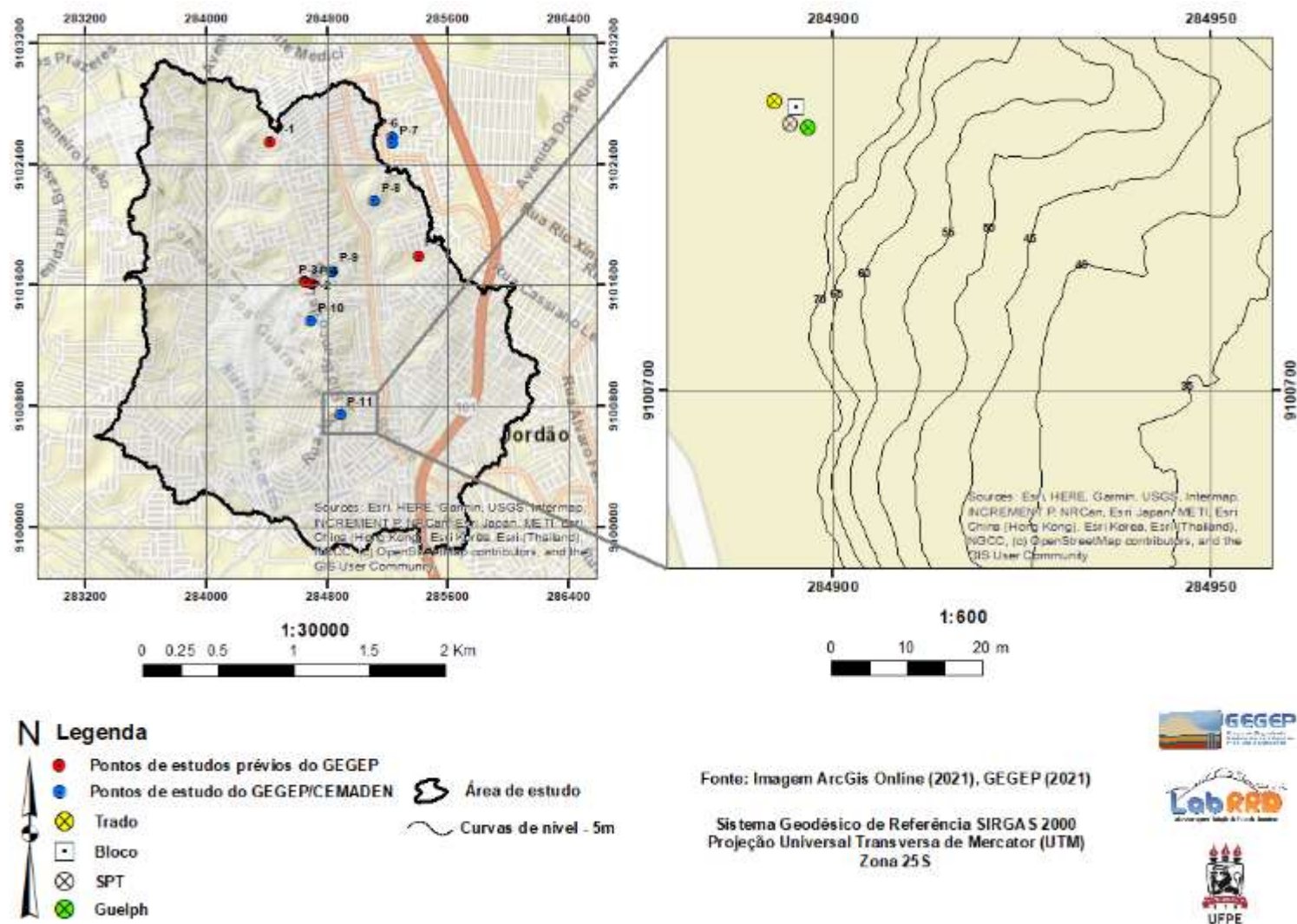
Fonte: O Autor (2022).

Tabela 28 - Ensaio de laboratório realizados pelo GEGEP no ponto P-11.

Ensaio de laboratório	Quantidade
Ensaio de caracterização	07
Ensaio de cisalhamento direto (CDN e CDI)	02
Ensaio edométrico (CDN e CDI)	02
Curva Característica	05

Fonte: O Autor (2022).

Figura 43 - Localização dos ensaios realizados em campo no ponto P-11.



Fonte: O Autor (2022).

Uma visão tridimensional da encosta do ponto P-11, extraída do *Google Earth*², é apresentada na Figura 44. Nessa figura estão indicados o local onde foi realizado os ensaios de campo e a área foi atingida por um deslizamento que resultou na destruição de um imóvel e também na morte de um morador no inverno de 2005. Este ponto está localizado na UR-05, no Bairro da COHAB, na cidade do Recife, especificadamente na Avenida João Rio Branco de Lima. Geologicamente o substrato dessa encosta foi identificado como pertencente a Formação Barreiras de fácies do tipo canal fluvial, cuja granulometria é preponderante arenosa.

Figura 44 - Detalhe da encosta (ponto P-11).



Fonte: O Autor (2022).

Na Figura 44 também é possível observar que a ocupação da encosta ocorreu de maneira desordenada com uma alta densidade de residências no topo e no pé da encosta. Em visitas realizados em campo foi possível identificar residências que lançam águas servidas diretamente na encosta, indicando a falta de infraestrutura do local, como mostrado na Figura 45. Ademais foi também constatada a presença de rachaduras que formam blocos arenosos que podem rolar encosta abaixo e atingir as casas que estão localizadas no pé da encosta, como ilustrado na Figura 46.

² Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>

Figura 45 - Lançamento de águas servidas diretamente na encosta.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 46 - Lançamento de lixo e processo de formação de blocos arenosos.



Fonte: O Autor (2022).

A população que reside nessa localidade afirma que há mais de 20 anos, vem ocorrendo deslizamentos nessa encosta (MORADORES..., 2014). Durante o período chuvoso de 2019 ocorrem alguns deslizamentos localizados no topo da encosta. O material deslizado ficou próximo de um imóvel, porém sem maiores danos como apresentado na Figura 47. A encosta possui uma altura de 30 metros e inclinação global de 51° , devido a isso, o material deslizado pode apresentar um alcance significativo podendo atingir os imóveis localizados próximos do seu pé. Devido o histórico de deslizamentos envolvendo uma vítima fatal a população teme a ocorrência de novos deslizamentos.

Figura 47 - Deslizamento ocorrido em junho de 2019: a) Ruptura; b) Material deslizado.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.2 Investigação de campo

Nesta seção será apresentado as investigações de campo realizadas na área de estudo. A investigação de campo desta pesquisa teve os seguintes objetivos: caracterizar o perfil geotécnico dos pontos de estudo do GEGEP/CEMADEM; avaliar o índice de resistência a penetração (N_{SPT}) e o perfil de umidade em profundidade do ponto P-11; realizar a coleta de amostras deformada e indeformada para realização de ensaios de laboratório e determinar a condutividade hidráulica por meio do permeâmetro de Guelph.

5.1.2.1 Levantamento topográfico por meio da tecnologia LiDAR

A topografia da área de estudo foi definida com base nos dados do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D)³ que tem como objetivo realizar o levantamento topográfico de todo o estado de Pernambuco por meio da tecnologia LiDAR. Esse mapeamento foi realizado pela Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC) em conjunto com o Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE). Os dados da Região Metropolitana do Recife (RMR) coletados por esse projeto foram cedidos ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Desastres e Planícies (GEGEP) por meio de mídias digitais. Através dos dados concedidos, foi possível gerar o Modelo

³ Maiores informações disponíveis em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>

Digital do Terreno (MDT). Este representa o terreno sem nenhuma cobertura e é geralmente utilizado para produzir curvas de nível.

O LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma tecnologia de sensoriamento remoto que por meio de varredura a laser, permite a obtenção de informações tridimensionais acerca da superfície terrestre com alta precisão em um pequeno intervalo de tempo e baixo custo (POPESCU; WYNNE; SCRIVANI, 2004; GIONGO et al., 2010). Segundo Hu et al. (2012), várias aplicações com a tecnologia LiDAR foram implementadas nos campos da geotecnia e geologia como: estimativa de volume; modelagem geométrica detalhada de queda de rochas em 3D; extração de informações geométricas de movimentos de massa e a avaliação estrutural de descontinuidades.

O princípio de funcionamento do LiDAR é semelhante ao sistema de RADAR, porém utilizando pulsos de laser. Os sensores a bordo de plataformas tripuladas ou não, lançam feixes de luz sobre a superfície terrestre e calcula a distância do alvo de interesse com base no tempo de retorno da luz refletida (BEMIS et al., 2014). A varredura a laser para confecção do MDT da bacia hidrográfica utilizada nessa dissertação, foi realizada em 2015, com escala de 1:5000, densidade de 0,5 ponto/m², perfilamento altimétrico com erro máximo de 10cm e resolução espacial de 1m, por consequência, o tamanho do pixel é 1m x 1m.

A Figura 48 ilustra o mapa altimétrico, gerado com base no MDT, juntamente com a localização dos pontos de estudo. A Tabela 29 apresenta a localização em UTM desses pontos, assim como, a altimetria dos mesmos em metros.

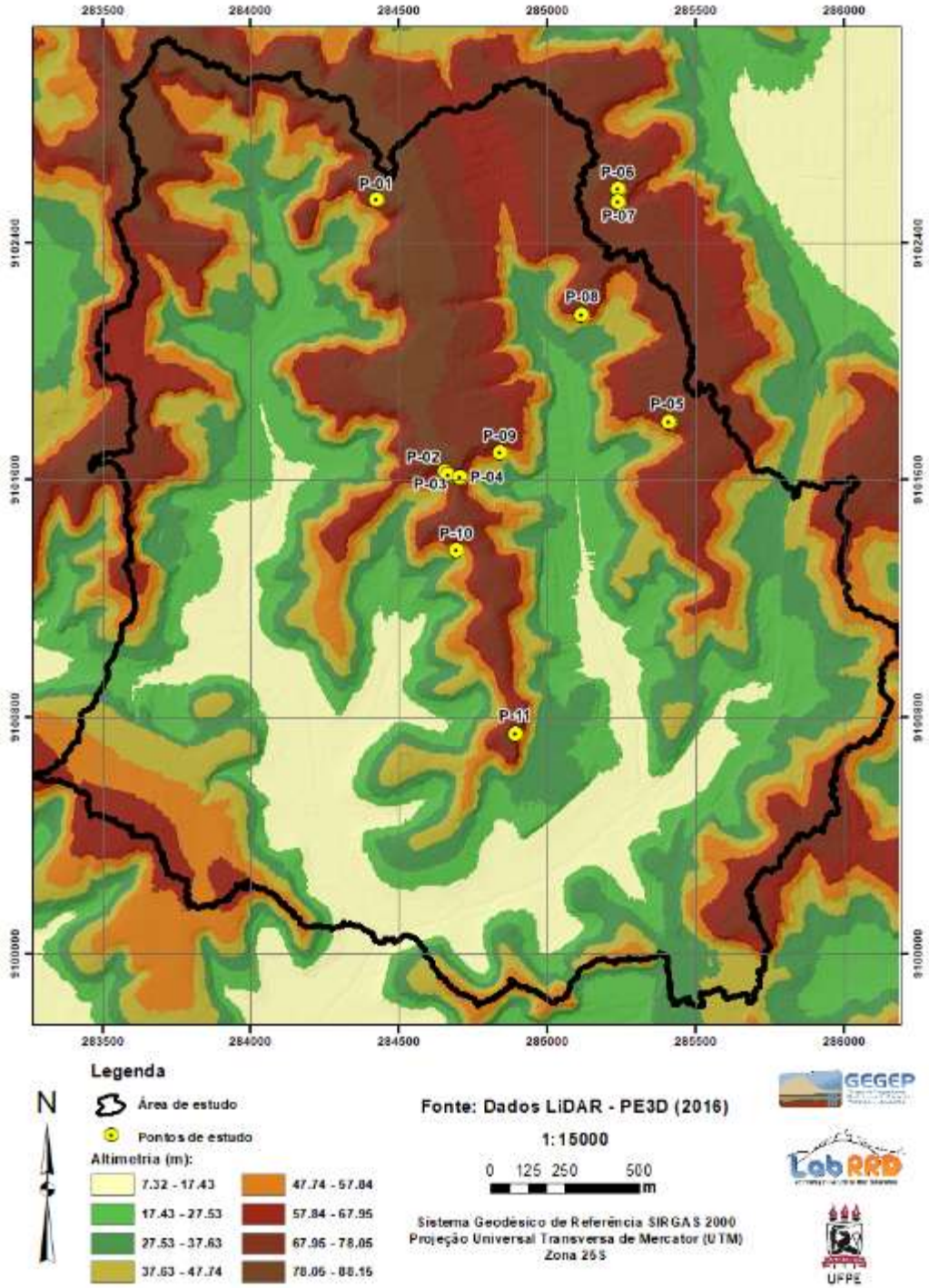
Tabela 29 - Altimetria dos pontos de estudo.

Pontos de estudo	Autor(a)	Localização (UTM)		Altimetria (m)
		Longitude	Latitude	
P-1	Santana (2006)	284425	9102547	78,03
P-2	Meira (2008)	284656	9101629	67,01
P-3	Meira (2008)	284668	9101618	65,19
P-4	Santos (2018)	284707	9101610	71,34
P-5	Santos (2018)	285410	9101797	70,80
P-6	GEGEP/CEMADEN (2021)	285241	9102583	76,00
P-7	GEGEP/CEMADEN (2021)	285240	9102540	76,20
P-8	GEGEP/CEMADEN (2021)	285119	9102159	59,80

P-9	GEGEP/CEMADEN (2021)	284845	9101694	52,10
P-10	GEGEP/CEMADEN (2021)	284696	9101364	47,80
P-11	GEGEP/CEMADEN (2021)	284895	9100743	70,80

Fonte: O Autor (2022).

Figura 48 - Mapa altimétrico da área de estudo com localização dos pontos de estudo.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.2.2 Investigação a trado manual e a percussão (SPT)

Visando conhecer em profundidade os materiais e a formação geológica dos pontos de estudo, foram realizados dois tipos de investigação de subsuperfície: a sondagem a trado manual nos pontos de estudo do GEGEP/CEMADEN, além de sondagem a percussão (SPT) no ponto P-11.

5.1.2.2.1 *Sondagem a trado manual*

O ensaio de sondagem a trado manual é normatizado pela ABNT NBR 9603 (2015). Segundo Delatim et al. (2013), a sondagem a trado é um método de investigação que utiliza o trado como ferramenta de perfuração. Os furos permitem uma rápida perfilagem do material atravessado e a retirada de amostras deformadas. A profundidade da investigação é pequena e é limitada pela consistência e coesão aparente do solo e pelo nível d'água (GEO-RIO, 2014).

A aplicação de sondagens a trado nesse estudo teve como objetivo a obtenção de amostras deformadas para determinação da ordenação e caracterização física das camadas de solo. Na Tabela 30 estão apresentadas informações das sondagens a trado realizadas na área de estudo pelo GEGEP/CEMADEN.

Tabela 30 - Informações das sondagens a trado realizadas na área de estudo pelo GEGEP/CEMADEN.

Pontos de estudo	Localização (UTM)		Cota (m)	Profundidade (m)
	Longitude	Latitude		
P-6	285241	9102583	76,00	0,0 - 3,0
P-7	285240	9102540	76,20	0,0 - 3,0
P-8	285119	9102159	59,80	0,0 - 3,0
P-9	284845	9101694	52,10	0,0 - 3,0
P-10	284696	9101364	47,80	0,0 - 3,0
P-11	284895	9100743	70,80	0,0 - 3,0

Fonte: O Autor (2022).

Na Figura 49 está apresentado o registro fotográfico da execução do ensaio realizada no ponto P-8, em maio de 2019. As atividades da sondagem a trado foram divididas em três etapas, a primeira refere-se ao processo de tradagem propriamente dita (Figura 49-a), o segundo passo corresponde a coleta do solo (Figura 49-b), transferindo-o para uma embalagem adequada, seguida da identificação das mesmas (Figura 49-c). Nas coletas realizadas nesse estudo, as amostras de solo foram

armazenadas em sacos plásticos, devidamente identificados, lacrados e armazenado em caixas de isopor reservadas em local adequado para evitar perda de umidade.

Figura 49 - Coleta de amostras deformadas por meio do trado no ponto P-8: a) processo de tradagem; b) coleta de solo; c) identificação das amostras.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.2.2.2 Sondagem a percussão (SPT)

O ensaio de penetração dinâmica (SPT) é normatizado pela ABNT NBR 6484 (2020). Nesse método de investigação o avanço da perfuração é feito por meio de trado ou de lavagem, sendo utilizada a cravação de um amostrador para a medida de índices de resistência à penetração (DELATIM et al., 2013). Através desse ensaio é possível descrever características visuais e táteis do solo, o número de golpes necessários para a penetração do amostrador a cada metro profundidade e a profundidade do nível freático no momento de realização do ensaio (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

A aplicação de sondagens do tipo SPT nesse estudo teve como objetivo a obtenção de conhecimento acerca da disposição das camadas do solo, os materiais que as constitui e a formação geológica da área. A sondagem do ponto P-11 foi realizada pela empresa Ensolo, no topo da encosta, no mês de maio de 2020, em dias ensolarados, alcançando 21,0 metros de profundidade. Com os resultados desse ensaio, utilizando a resistência a penetração como critério, determinou-se os locais de coleta de amostra deformada e indeformada. Na

Figura 50 está apresentado o registro fotográfico da execução do ensaio SPT realizada no ponto P-11.

Figura 50 - Execução do Ensaio SPT no ponto P-11.



Fonte: O Autor (2022).

O ensaio SPT também permite a retirada de amostras deformadas para realização de ensaios de laboratório por meio do emprego de amostradores especiais (VELLOSO; LOPES, 2011). Schnaid e Odebrecht (2012), recomendam utilizar o solo coletado para determinação do teor de umidade e porcentagem de finos. Nesse estudo, no entanto, as amostras retiradas do amostrador padrão, foram utilizadas para determinação da umidade pelo método da estufa, ou seja, umidade gravimétrica (ABNT NBR 16097, 2012). Em seguida, esses dados foram utilizados para definição do perfil de umidade, gráfico que relaciona a umidade com a profundidade. As amostras coletadas foram protegidas contra a perda de umidade em embalagens plásticas e acondicionadas em caixas de isopor.

5.1.2.3 Permeâmetro de Guelph

A condutividade hidráulica, expressa a facilidade que um fluido percola pelos vazios do solo (VILAR; FERREIRA, 2015). O permeâmetro de Guelph é um instrumento usado para medir em campo a condutividade hidráulica do solo, o coeficiente de armazenamento e a matriz potencial de fluxo acima do nível d'água (FERNANDES, 2017). Esse e outros métodos para determinação da condutividade hidráulica são descritos pela norma ASTM D5126 (2016).

Segundo Supo (2008), o aparelho foi desenvolvido por Reynolds e Elrick (1983), e foi aperfeiçoado em 1985, na University of Guelph, Canadá (ELRICK, 1985). É composto basicamente por uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante de água dentro do furo, um tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares (AGUIAR, 2001).

De forma sucinta, o procedimento de ensaio consiste em abrir um furo no solo com um trado, em seguida, instala-se o equipamento e enche-se o seu reservatório do mesmo com água. Concluída essa etapa, eleva-se o tubo de ar do aparelho para uma altura pré-estabelecida (H), permitindo a passagem de água até a formação de uma lâmina d'água dentro do furo. Após algum tempo, uma pequena área em torno do furo ficará saturada, criando um bulbo de saturação, nesse estágio o fluxo de saída água (Q) torna-se constante, sendo os valores lidos nessa fase utilizados no cálculo da condutividade hidráulica (AGUIAR, 2001; MEIRA, 2008). A Figura 51 ilustra o procedimento de instalação e realização do ensaio com o permeâmetro de Guelph.

Figura 51 - Procedimento de instalação e realização do ensaio com o permeâmetro de Guelph: a) realização do furo com o trado, b) instalação do equipamento, c) realização das leituras durante o ensaio.



Fonte: O Autor (2022).

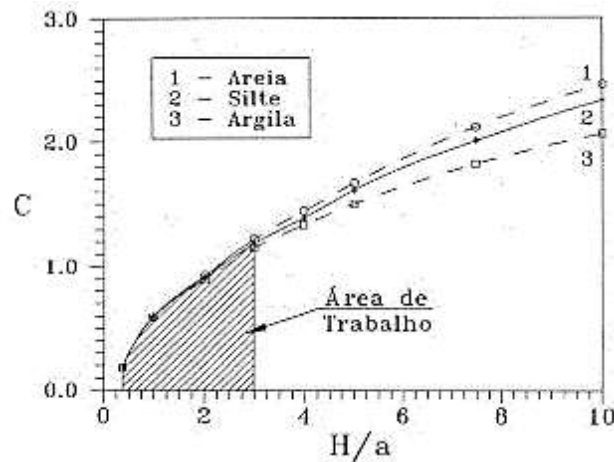
O ensaio foi realizado até a profundidade de 3,0 metros, devido ao surgimento de camada laterizada resistente não foi possível alcançar profundidades maiores. Foram realizadas determinações a cada metro de profundidade, além disso, coletou-se o solo de cada profundidade ensaiada antes e após cada determinação com o intuito de aferir a umidade através do método da estufa (ABNT NBR 16097, 2012). As amostras coletadas foram protegidas contra a perda de umidade em embalagens plásticas e acondicionadas em caixas de isopor.

A partir das leituras obtida, os valores da vazão Q é calculado pela Equação (20). A equação possui três termos, os dois primeiros termos representam o fluxo na condição saturada, e o terceiro termo está relacionado ao fluxo em condição não saturada.

$$Q = \frac{2\pi H^2}{C} K_{fs} + \pi a^2 K_{fs} + \frac{2\pi H}{C} \phi_m \quad (20)$$

Em que: Q é a vazão em regime de fluxo permanente (m^3/s); K_{fs} é a condutividade hidráulica saturada em campo (m/s); ϕ_m é o potencial mátrico de fluxo (m^2/s); H é a carga hidráulica (m); a é o raio da cavidade (furo) no solo (m) e C é o parâmetro adimensional que depende da relação (H/a), para determiná-lo aplica-se o ábaco apresentado na Figura 52.

Figura 52 - Curvas para obtenção do parâmetro C .



Fonte: Campos (1994).

Vários métodos podem ser utilizados para determinação da condutividade hidráulica (K_{fs}) e o potencial de fluxo mátrico (ϕ_m). O método de Elrick et al. (1989), permite a determinação desses parâmetros por meio da aplicação das Equações (21) e (22) para uma única altura de carga hidráulica.

$$K_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + \frac{2\pi H}{C}} \quad (21)$$

$$\phi = \frac{CQ}{(2\pi H^2 + C\pi a^2)\alpha + 2\pi H} \quad (22)$$

O α é uma constante que depende das propriedades do solo. Os valores típicos são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Valores de α segundo o tipo de solo.

$\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	Tipo de Solo
0,01	Argilas compactadas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos).

0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macro poros e fissuras.
0,12	Argilas até areias finas com alta e moderada quantidade de macro poros e fissuras.
0,36	Areias Grossas inclui solos com macro poros e fissuras.

Fonte: Elrick et al. (1989).

5.1.2.4 Amostragem

A coleta de amostras deformadas e indeformadas é normatizado pela ABNT NBR 9604 (2016). As amostras deformadas tratam-se de uma porção de solo desagregado utilizada na identificação visual e táctil e nos ensaios de classificação (granulometria, limites de consistência e massa específica dos sólidos). Já as amostras indeformadas devem conservar a estrutura e o teor de umidade do solo, além da textura e composição mineral e são usadas para determinar parâmetros geológico-geotécnicos como o coeficiente de permeabilidade, os parâmetros de compressibilidade e de resistência ao cisalhamento (NOGUEIRA, 1995).

A coleta da amostra indeformada foi iniciada por meio da escavação manual até 1,00 m de profundidade a partir do topo da encosta, em agosto de 2020. Após a execução do poço o bloco foi moldado com auxílio de um ferro de cova e uma faca até alcançar secções transversais aproximadamente iguais a da caixa de madeira (0,30 x 0,30 x 0,30 m). Em seguida, o bloco foi envolvido com materiais apropriados na seguinte ordem: papel filme, papel alumínio e tecido de algodão. Por último, deve-se pincelar com parafina derretida as laterais, a base e o topo do bloco até formar uma película que irá impedir a perda de umidade. Após esses procedimentos o bloco foi acondicionado em uma caixa de madeira, seccionados e devidamente fechado. Por fim, o bloco foi identificado e encaminhado para a câmara úmida do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. A Figura 53 ilustra o procedimento realizado em campo para coletar a amostra indeformada.

As amostras indeformadas, por sua vez, foram retiradas no mesmo local e na mesma cota onde as amostras indeformadas foram extraídas e foram armazenadas e transportadas em sacos indicados para esse fim. Estas também foram guardadas na câmara úmida do laboratório de solos da UFPE.

Figura 53 - Procedimento de coleta de amostra indeformada: a) moldagem do bloco; b) cobertura com papel filme; c) cobertura com papel alumínio; d) cobertura com tecido de algodão.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.3 Ensaios de laboratório

Nesta seção será apresentado a metodologia dos ensaios realizados em laboratório. O emprego desses ensaios teve como objetivo: realizar a caracterização física dos materiais coletados nos pontos de estudo do GEGEP/CEMADEN, determinar a curva características dos mesmos pontos e os parâmetros de resistência e compressibilidade do ponto P-11.

5.1.3.1 Ensaios de Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física visam identificar e fornecer parâmetros físicos dos solos como umidade, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg e análise granulométrica. Eram utilizados inicialmente para inferir propriedades mecânicas dos solos e fazer correlações empíricas (FORTES; FERREIRA, 2018). Neste trabalho os ensaios de caracterização física, foram realizados obedecendo as seguintes normas brasileiras:

- NBR 6457 (2016): Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 7181 (2016): Solo - Análise granulométrica;

- NBR 6458 (2016): Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água;
- NBR 6459 (2016): Solo - Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180 (2016): Solo - Determinação do limite de plasticidade,

O ensaio de análise granulométrica, especificadamente a etapa de sedimentação foi realizada de duas formas distintas; com e sem adição de defloculante (hexametáfosfato de sódio). O defloculante é responsável por neutralizar as cargas elétricas das partículas menores do solo, desagregando-as. Dessa maneira, o objetivo dos procedimentos utilizados é determinar a granulometria do solo.

Na Tabela 32, estão apresentadas as quantidades e as profundidades das amostras coletas em cada ponto de estudo do GEGEP/CEMADEN para a realização dos ensaios de caracterização física.

Tabela 32 - Informações dos ensaios de caracterização física realizados pelo GEGEP/CEMADEN.

Pontos de estudo	Método de coleta	Data de coleta	Identificação da amostra	Prof. (m)
P-6	Trado	10/03/2021	AMP-6.1	0,0 - 0,5
			AMP-6.2	0,5 - 1,0
			AMP-6.3	1,0 - 1,5
			AMP-6.4	1,5 - 2,0
			AMP-6.5	2,0 - 2,5
			AMP-6.6	2,5 - 3,0
P-7	Trado	10/05/2019	AMP-7.1	0,0 - 0,5
			AMP-7.2	0,5 - 1,0
			AMP-7.3	1,0 - 1,5
			AMP-7.4	1,5 - 2,0
			AMP-7.5	2,0 - 2,5
			AMP-7.6	2,5 - 3,0
P-8	Trado	11/05/2019	AMP-8.1	0,0 - 0,5
			AMP-8.2	0,5 - 1,0
			AMP-8.3	1,0 - 1,5
			AMP-8.4	1,5 - 2,0
			AMP-8.5	2,0 - 2,5
			AMP-8.6	2,5 - 3,0

P-9	Trado	16/05/2019	AMP-9.1	0,0 - 0,5
			AMP-9.2	0,5 - 1,0
			AMP-9.3	1,0 - 1,5
			AMP-9.4	1,5 - 2,0
			AMP-9.5	2,0 - 2,5
			AMP-9.6	2,5 - 3,0
P-10	Trado	10/03/2021	AMP-10.1	0,0 - 0,5
			AMP-10.2	0,5 - 1,0
			AMP-10.3	1,0 - 1,5
			AMP-10.4	1,5 - 2,0
			AMP-10.5	2,0 - 2,5
			AMP-10.6	2,5 - 3,0
P-11	Trado	15/05/2019	AMP-11.1	0,0 - 0,5
			AMP-11.2	0,5 - 1,0
			AMP-11.3	1,0 - 1,5
			AMP-11.4	1,5 - 2,0
			AMP-11.5	2,0 - 2,5
			AMP-11.6	2,5 - 3,0
	Bloco	29/08/2020	AMP-BL-1	0,7 - 1,0

Fonte: O Autor (2022).

O registro fotográfico da execução do ensaio de sedimentação com a adição de defloculante nas amostras coletadas no ponto P-7 está apresentado na Figura 54.

Figura 54 - Realização do ensaio de sedimentação com adição de defloculante nas amostras coletadas no ponto P-7.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.3.2 Curva Característica do Solo

A curva característica é uma relação constitutiva fundamental na mecânica do solo não saturado e trata-se de um gráfico responsável por elucidar a relação existente entre o teor de água e a sucção do solo (LU; LIKOS, 2004; MURRAY; SIVAKUMAR, 2010; FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Em linha gerais, a curva característica descreve o fato de que a sucção do solo aumenta quando o conteúdo da água diminui e vice-versa. O seu formato é variável e depende de muitos fatores, incluindo a granulometria do solo, distribuição de tamanho de poro, estrutura e textura do solo (BRIAUD, 2013). A maioria dos processos em solos não saturados podem ser, em parte, compreendidos em função da curva de retenção, ela é necessária para a análise de problemas de infiltração, resistência ao cisalhamento, variação de volume, fluxo de ar e fluxo de calor envolvendo solos não saturados (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012; GITIRANA JUNIOR; MARINHO; SOTO, 2015).

Foram coletadas amostras indeformadas para a determinação de curvas características nos pontos P-7, P-8, P-9 e P-11. No total foram coletadas 20 amostras indeformadas, as profundidades de cada amostra estão expostas na Tabela 33.

Tabela 33 - Informações das amostras indeformadas coletadas pelo GEGEP/CEMADEN para determinação da curva característica do solo.

Pontos de estudo	Identificação da amostra	Profundidade (m)
P-7	CC-AMP-7.1	0,5
	CC-AMP-7.2	1,0
	CC-AMP-7.3	1,5
	CC-AMP-7.4	2,0
	CC-AMP-7.5	2,5
P-8	CC-AMP-8.1	0,5
	CC-AMP-8.2	1,0
	CC-AMP-8.3	-
	CC-AMP-8.4	2,0
	CC-AMP-8.5	2,5
	CC-AMP-8.6	-
P-9	CC-AMP-9.1	0,5
	CC-AMP-9.2	1,0
	CC-AMP-9.3	1,5
	CC-AMP-9.4	2,0
	CC-AMP-9.5	2,5
	CC-AMP-9.6	3,0
P-11	CC-AMP-11.1	0,5
	CC-AMP-11.2	1,2
	CC-AMP-11.3	1,5
	CC-AMP-11.4	2,0
	CC-AMP-11.5	2,5

Fonte: O Autor (2022).

As amostras indeformadas utilizadas para determinação da curva característica do solo foram coletadas em buchas de redução longa do tipo 50 x 40mm, coladas em uma das extremidades de um tubo de PVC de tamanho e diâmetro adequado. Para cada ponto de estudo foram realizados furos no solo por meio de um trado até profundidades pré-determinadas, em seguida, foi inserido no furo a bucha acoplada em um tubo de PVC. A bucha foi cravada no solo por meio de golpes de um martelo de borracha amortecidos por uma ponteira de borracha colocando na extremidade livre do tubo do PVC para evitar a compactação do solo. Após a cravação o aparato é retirado do furo e a bucha é cortada do tubo PVC com cuidado para não perturbar a estrutura do solo coletado. As amostras cortadas foram embaladas em papel filme e

plástico bolha e armazenadas em caixas de isopor, Maiores detalhes da metodologia de coleta é apresentado na Figura 55.

Figura 55 - Procedimento de coleta de amostra indeformada: a) Martelo de borracha; b) ponteira de borracha; c) Aparato utilizado para coleta do solo; d) Abertura do furo por meio do trado; e) Cravação da bucha por meio dos golpes do martelo; f) Processo de corte da amostra.



Fonte: O Autor (2022).

A norma ASTM D6836 (2016) descreve vários métodos para determinação da curva característica. Segundo Marinho, Soto e Gitirana Junior (2015) os quatro métodos mais comuns para a determinação da curva de retenção: a placa de sucção, a placa de pressão, o método do papel filtro e o método do equilíbrio de vapor. Esses métodos se destacam por serem relativamente simples e em alguns casos são complementares no que concerne à faixa de sucções possível em cada método.

As técnicas utilizadas nesse estudo para determinação da curva característica foram a do papel filtro e da mesa de tensão, por meio da secagem. Segundo a Teixeira e Behring (2017), o funcionamento das mesas de tensão é embasado na remoção de água de uma determinada amostra até uma determinada sucção controlada mediante a aplicação de uma diferença de potencial gerada por uma coluna de água pendente ou bomba de vácuo. As tensões comumente aplicadas às amostras são 0 kPa; 1 kPa; 3 kPa; 6 kPa e 10 kPa para as mesas de tensão de areia, sendo possível atingir tensões de até 50 kPa em mesas de areia-caolin ligadas à uma bomba de vácuo.

Nesse ensaio as amostras devem ser previamente saturadas por capilaridade, recomenda-se que sejam afixadas telas de náilon na parte inferior dos amostradores com elástico para evitar a perda de solo. A saturação é verificada quando é observado o brilho da água na superfície da amostra. Em seguida, as amostras são postas na

mesa de tensão e submetidas a determinados potenciais de tensão até cessar a drenagem da água retida nos poros do solo das amostras.

Quando o equilíbrio é alcançado, deve-se realiza a pesagem do solo e anotar os resultados, pois a umidade da amostra é definida por gravimetria. Logo após esse procedimento tal amostra deve ser colocada novamente na mesa de tensão para determinação do próximo nível. Todas essas etapas são repetidas até o ultimo nível. Recomenda-se que durante o ensaio a mesa de tensão permaneça coberta para reduzir a perda de água por evaporação.

As amostras desse estudo foram submetidas progressivamente às tensões: 0, 0,1, 0,2, 0,5 e 1 kPa utilizando-se mesa de tensão de caolin sem bomba a vácuo. Sucções maiores foram determinadas mediante o emprego da técnica do papel filtro. A

Figura 56 apresenta as etapas do ensaio para determinação da sucção por meio da mesa de tensão.

Figura 56 - Etapas do ensaio para determinação da sucção por meio da mesa de tensão: a) preparação da amostra com telas de náilon e elástico; b) processo de saturação do solo por capilaridade; c) Realização do ensaio com mesa de tensão coberta.



Fonte: O Autor (2022).

A técnica para determinação da sucção por meio do papel filtro é a mais simples e econômica de todas (MARINHO; SOTO; GITIRANA JUNIOR, 2015). Esse método é descrito pela norma ASTM D5298 (2016) e trata-se de um método indireto para medir a sucção do solo numa faixa de variação entre 10 e 100,000 kPa. Através dessa técnica é possível determinar a sucção total e matricial do solo; a sucção matricial é medida quando o papel filtro não está em contato direto com a amostra do solo, enquanto a sucção total é medida quando o papel filtro está em contato com a amostra do solo (MURRAY; SIVAKUMAR, 2010). No primeiro caso o fluxo de água do solo

para o papel ocorre em forma de vapor, no segundo caso, o contato direto entre o papel filtro e o solo faz com que o fluxo de água ocorra por capilaridade.

Para iniciar o ensaio de sucção com a técnica do papel filtro é necessário colocar o papel filtro em contato com a amostra de solo, com a posição de acordo com o tipo de sucção que se deseja medir (mátrica, total ou ambos). Após essa etapa o conjunto é embrulhado com filme de PVC e papel alumínio respectivamente. Essas amostras, então, devem ser armazenadas em local com temperatura constante, geralmente por 7 dias, até que o papel filtro alcance o equilíbrio de tensão com a amostra.

Alcançado o equilíbrio, o papel filtro é pesado úmido e após ser seco em estufa para se determinar o seu conteúdo de água. A sucção do solo é obtida indiretamente usando as equações que relacionam umidade do papel com a sucção (BLIGHT, 2013; BRIAUD, 2013). Após a retirada dos papéis filtros, os corpos de prova devem ser expostos ao ambiente para que ocorra a perda de umidade e, assim, iniciar um novo ciclo.

A Figura 57 apresenta as etapas para determinação da sucção através da aplicação do papel filtro.

Figura 57 - Etapas para determinação da sucção mediante o emprego da técnica do papel filtro: a e b) determinação da sucção total (papel filtro em contato com solo); c e d) determinação da sucção mátrica (papel filtro sem contato com o solo); e) amostra embrulhada com filme de PVC; f) amostra embrulhada com papel alumínio.



Fonte: O Autor (2022).

Como o papel de filtro é extremamente sensível para evitar a troca de umidade com o ambiente e consequentemente resultados enganosos, as pesagens devem ser

realizadas com extrema cautela e rapidez, de preferência o papel filtro deve ser manuseadas com pinças e saco plástico selado. Segundo Murray e Sivakumar (2010), a precisão das medições de sucção usando o método do papel filtro depende da qualidade desse papel, da sensibilidade da balança, da precisão da calibração, da temperatura e do tempo de equilíbrio.

Com nos ensaios realizados foi utilizado o papel filtro qualitativo Whatman 42, a sucção foi estimada por meio da aplicação das equações desenvolvidas por Chandler et al. (1992).

- Para a umidade $w_{papel} \leq 47\%$, a sucção S é dada pela Equação (23):

$$S \text{ (kPa)} = 10^{4,84-0,0622w(\%)} \quad (23)$$

- Para a umidade $w_{papel} > 47\%$, a sucção S é dada pela Equação (24):

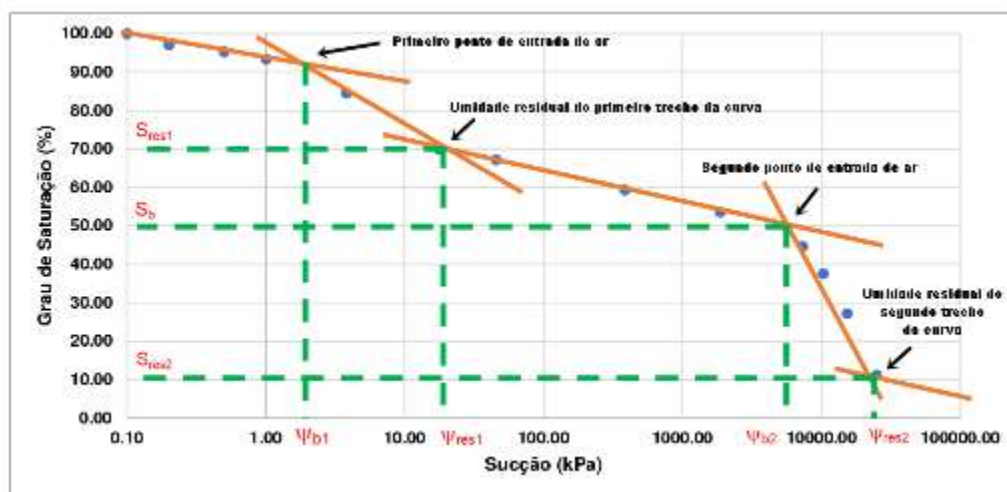
$$S \text{ (kPa)} = 10^{6,05-2,48 \log(w\%)} \quad (24)$$

As curvas características geradas foram ajustadas por meio do modelo desenvolvido por Gitirana Junior e Fredlund (2004). As equações desse modelo conseguem ajustar curvas características unimodais e bimodais. Esse modelo é baseado na equação da hipérbole, desse modo os parâmetros da equação são coordenadas onde as hipérboles assíntotas se encontram. Esse modelo foi adotado porque as curvas características desse estudo apresentaram formato bimodal, conforme o apresentado no item 6.2.2, devido possuírem estrutura com dupla porosidade (LI; LI; ZHANG, 2014). Desse modo, estas possuem dois pontos de entrada de ar e dois pontos de umidade residual distintos, resultando em quatro pontos de flexão. No modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) são necessários oito parâmetros para representar uma curva característica bimodal: Ψ_{b1} , Ψ_{res1} , S_{res1} , Ψ_{b2} , S_b , Ψ_{res2} , S_{res2} e a usado para definir a nitidez das transições nos pontos de curva. A Figura 58 apresenta a localização dos parâmetros de ajuste desse modelo na curva característica.

O parâmetro Ψ_{b1} representa a sucção correspondente ao primeiro ponto de entrada de ar; Ψ_{res1} representa a sucção correspondente a umidade residual do primeiro trecho da curva característica bimodal; S_{res1} representa o grau de saturação da umidade residual do primeiro trecho da curva característica bimodal; Ψ_{b2} representa a sucção corresponde ao segundo ponto de entrada de ar; S_b representa

o grau de saturação do segundo ponto de entrada de ar; Ψ_{res2} representa a sucção correspondente a umidade residual do segundo trecho da curva característica bimodal; S_{res2} representa o grau de saturação da umidade residual do segundo trecho da curva característica bimodal.

Figura 58 – Localização dos parâmetros de ajuste do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) na curva característica bimodal.



Fonte: O Autor (2022).

5.1.3.3 Ensaio Edométrico

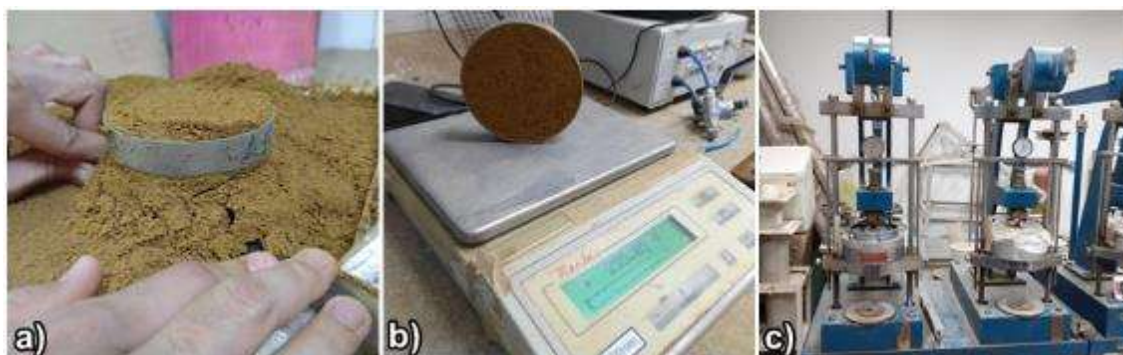
Os procedimentos, o aparelho e a preparação do corpo de prova do ensaio edométrico são descritos pela ABNT NBR 12007 (1990). Nesse estudo foi realizado ensaio edométrico duplo na condição inundada e natural visando definir e avaliar parâmetros de compressibilidade, entre eles: C_v – coeficiente de adensamento vertical; C_c – índice de compressão; C_s – índice de expansão; m_v – coeficiente de compressão volumétrica; E'_{oed} – módulo edométrico; a tensão de escoamento e avaliação do colapso do solo.

Os ensaios foram realizados através de duas prensas de adensamento do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, fabricada pela Ronald Top S/A, do tipo convencional, com sistema de cargas verticais, através de pesos em pendural com relação de braço 1:10 e células edométricas do tipo anel fixo. As leituras das deformações foram realizadas através dos extensômetros, da marca Mitutoyo, com sensibilidade de 0,01mm.

Os corpos de prova foram moldados por meio da cravação de anéis com área de 60 cm² e 2 cm de altura na amostra indeformada, em seguida eram cortadas e

niveladas com régua metálicas. No total, foram moldados dois corpos de prova, em que um foi destinado para a realização do ensaio na condição natural e o outro para condição inundada. A Figura 59 ilustra as etapas de realização do ensaio de adensamento.

Figura 59 - Etapas de realização do ensaio de adensamento: a) e b) moldagem e nivelamento do corpo de prova; c) prensas de adensamento utilizadas.



Fonte: O Autor (2022).

Os ensaios edométricos foram realizados utilizando os seguintes intervalos de tensões: 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1280 kPa no carregamento e 1280, 640, 160, e 40 kPa no descarregamento. A metodologia consistiu em aplicar uma tensão pré-determinada nos corpos de prova e fazer as leituras no extensômetro até que se obtenha a estabilização das deformações (em torno de 24h). As leituras de deformação realizadas a cada estágio foi de 0, 9, 15 e 30 segundos e a 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos. Além disso, as umidades inicial e final de cada ensaio foram determinadas através do método da estufa.

5.1.3.4 Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é normatizado pela ASTM D3080 (2011), e trata-se do mais antigo e mais simples procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Através dele é possível determinar os parâmetros de resistência do solo como o ângulo de atrito (ϕ) e intercepto de coesão (c) sob condições drenada.

Entretanto, devido sua simplicidade este ensaio possui limitações como: não permitir que o solo rompa ao longo do plano mais fraco, não aferir parâmetros de deformabilidade do solo e não possibilitar o controle da drenagem de forma precisa. Entretanto, ele é amplamente empregado no meio geotécnico quando o objetivo é

simplesmente determinar a resistência ou conhecer a resistência residual (PINTO, 2006; DAS, 2007; BUDHU, 2010; KALINSKI, 2011).

Os ensaios foram realizados através de uma prensa de cisalhamento direto padrão do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, fabricada pela Ronald Top S/A, com sistema de cargas verticais, através de pesos em pendural. As leituras das deformações verticais e deslocamentos horizontais foram realizadas através dos extensômetros, da marca Mitutoyo, com sensibilidade de 0,01mm, enquanto que as forças horizontais aplicadas aos corpos de prova foram determinadas através de um anel de carga.

Os corpos de prova foram moldados com seção transversal quadrada, por meio da cravação de uma caixa prismática com ponta biselada na amostra indeformada, apresentando aproximadamente 100 mm de aresta e 40 mm de altura. Neste trabalho foram realizados ensaios de cisalhamento direto nas condições natural e inundada. Desse modo, foram moldados quatro corpos de prova para condição natural e quatro corpos de prova para a condição inundada, totalizando oito corpos de prova, visando ensaiar diferentes tensões verticais. A Figura 60 ilustra as etapas de realização do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 60 - Etapas de realização do ensaio de cisalhamento direto: a) moldagem do corpo de prova; b) realização do ensaio na prensa de cisalhamento; c) amostra cisalhada após o ensaio.



Fonte: O Autor (2022).

Os ensaios na condição natural de umidade foram iniciados por um processo de adensamento anterior ao cisalhamento por um período de 1 hora para alcançar a estabilização dos recalques. Porém, na condição inundada, antes do adensamento de 1 hora, as amostras eram embebidas por 24h, visando simular invernos rigorosos.

Após estas etapas deu-se início ao processo de cisalhamento adotando uma velocidade de 0,25 mm/min, determinada conforme as recomendações descritas por Head e Epps (2006), com a finalidade de não gerar poropressão, para que o resultado

seja considerado drenado. As tensões normais utilizadas foram de 50,100, 150 e 200 kPa. Além disso, as umidades no início e final de cada ensaio foram aferidas através do método da estufa.

5.1.4 Plataforma geotécnica de coleta de dados – PCD Geotécnica

Com o intuito de prevenir deslizamentos de terra, o projeto GEGEP/CEMADEN instalou pluviômetros que medem a quantidade de chuva e sensores de umidade dos solos que medem a quantidade de água no solo. Esse conjunto é denominado de Plataforma Geotécnica de Coleta de Dados ou de forma mais simples como PCD Geotécnica.

O objetivo das PCDs Geotécnicas é relacionar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva de forma simultânea e em tempo real, permitindo o CEMADEN realizar um monitoramento intensivo e, dessa forma, emitir alertas de risco de para as Defesas Civas Municipais. Desse modo, esse órgão terá melhores condições para proteger sua comunidade de desastres naturais.

A Tabela 34 apresenta a localização das PCDs instaladas na área de estudo e suas respectivas denominações. Inicialmente foram instaladas em maio de 2019 as PCDs: P-07, P-08, P-09 e P-11. Em 2020, devido a vandalismos e a pedido dos moradores, as PCDs P-07 e P-09, foram desativadas. Em contrapartida, em março de 2021, foram instalados novos equipamentos, criando assim, os pontos P-06, para restituir o ponto P-07, e o ponto P-10 para compensar a desativação do ponto P-09.

Tabela 34 - Localização das PCDs Geotécnicas instaladas na área de estudo.

Pontos de estudo	Denominação	Localização (UTM)	
		Longitude	Latitude
P-06	UR3 – IBURA	285241	9102583
P-07	UR3 – IBURA	285240	9102540
P-08	Lagoa Encantada - COHAB	285119	9102159
P-09	UR2 – COHAB	284845	9101694
P-10	UR12 – COHAB II	284696	9101364
P-11	UR12 - COHAB	284895	9100743

Fonte: O Autor (2022).

As PCDs Geotécnicas são instaladas em áreas de risco geológicos em encostas e são compostas por um pluviômetro. PCD é equipada com data logger responsável por disponibilizar os dados coletados na rede e por uma sonda com sensores de

umidade, comercialmente conhecidas como EnviroScan. Além disso, vale ressaltar que todos os equipamentos das PCDs Geotécnicas são alimentados por meio de energia solar.

Nesse estudo, as sondas instaladas possuem uma haste com 3 metros de profundidade, com sensores instalados no seu comprimento a cada meio metro, totalizando 6 sensores por sonda. Estas hastes ficam instaladas dentro de um tubo de PVC com diâmetro de 56,5 mm inserido no solo (SENTEK, 2011). A Figura 61 ilustra os equipamentos que compõem uma PCD. Além disso, também são mostrados detalhes do sensor utilizado para aferir a umidade em campo.

Figura 61 - Composição das PCD Geotécnicas.



Fonte: Adaptado de Geosori (2019)⁴.

As sondas do tipo EnviroScan medem a umidade do solo indiretamente por meio da tecnologia Frequency Domain Reflectometry – FDR (CAMARGO et al., 2012). Segundo Moncks (2020) as sondas de capacitância permitem a determinação do teor volumétrico de água através do perfil do solo em tempo real. As leituras das sondas são realizadas automaticamente e transmitidas com a constância determinada pelo operador. Entretanto, a confiabilidade das leituras somente é possível mediante a calibração local dos sensores, segundo Sentek (2011), sem a calibração as leituras não podem ser consideradas como dados exatos.

A tecnologia FDR mede as mudanças da constante dielétrica (K) do solo. Essa propriedade varia em função da umidade presente, desse modo, é possível obtê-la de forma indiretamente. Essa constante é a razão da permissividade do meio (ϵ) com a permissividade do vácuo (ϵ_0). Nesse método, também conhecido como “técnica da capacitância”, o solo é considerado um capacitor, material isolante que impede a

⁴ Disponível em: <https://www.geosensori.com.br/2019/05/21/em-foco-3/>.

passagem de corrente elétrica de um eletrodo para outro, sendo, responsável por armazenar carga elétrica. Consequentemente, quanto mais água houver no solo, menor será a carga armazenada, pois a água é uma boa condutora de eletricidade e o material dielétrico terá uma menor eficiência, então através dessas variações é possível determinar o teor volumétrico de água no solo (OLIVEIRA, 2016).

O procedimento para instalação da sonda é detalhado na Figura 62, inicialmente é realizado por meio de um trado a abertura de um furo, em seguida os sensores da sonda são acondicionados em um tubo de PVC. Dar-se início a preparação do slurry, mistura de caulinita com água, utilizada para preencher os vazios entre a sonda e o solo. Após a preparação essa mistura é lançada no furo com o auxílio de um funil e a sonda é colocada no furo lentamente para evitar o vazamento desnecessário do slurry e também a formação de bolhas de ar que podem comprometer a qualidade das leituras realizadas.

Figura 62 - Procedimentos para instalação da sonda do tipo EnviroScan: a) abertura do furo; b) acondicionamento dos sensores no tubo de PVC; c) preparação do slurry com caulinita; d) inserção do slurry no furo; e) inserção da sonda no furo; f) finalização.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 63 mostra a PCD UR12 – COHAB, instalada no ponto P-11. Na imagem é possível identificar o pluviômetro, o painel solar responsável por alimentar o sistema e o data logger responsável por armazenar e lançar as leituras realizadas na rede.

Figura 63 - PCD instalada no ponto P-11.



Fonte: O Autor (2022).

5.2 ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE REGIONAL A DESLIZAMENTOS RASOS

Nessa seção será apresentado a metodologia utilizada para a análise de suscetibilidade de modo regional utilizando o TRIGRS. O Modelo TRIGRS necessita em suas análises de parâmetros topográficos, pluviométricos, geotécnicos e hidrológicos. Os parâmetros topográficos, são representados pelo MDT concedidos pelo projeto PE3D, conforme esclarecido no item 5.1.2.1. Os dados pluviométricos utilizados foram disponibilizados pelo CEMANDEN. Conforme apresentado no item 3.3, cada zona de propriedade requer parâmetros geotécnicos e hidrológico. Sendo eles: c , φ , γ_s , D_0 , K_z , θ_s , θ_r , e α .

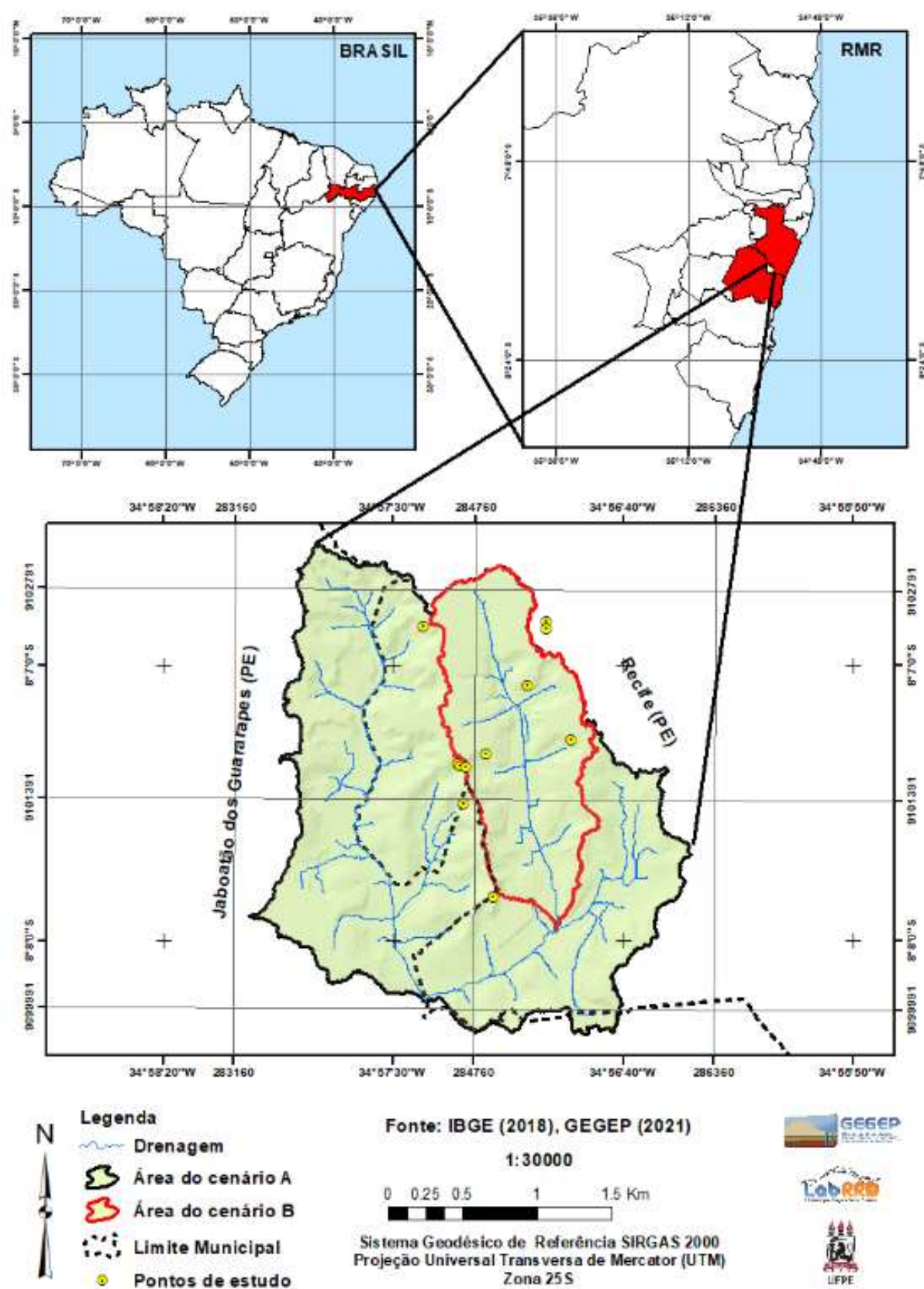
Alguns dos parâmetros hidráulicos como a difusividade característica máxima (D_0) e a taxa de infiltração inicial (I_{ZLT}) foram determinadas a partir de referências empíricas. Tran et al. (2017) destaca que esses dados são difíceis de definir por testes de laboratório devido à sua ampla faixa de variação. Nesse estudo foi assumido que a difusividade hidráulica, $D_0 = 100 \times K_{sat}$, conforme proposto por Viet et al. (2017); TRAN et al. (2017) e Marin, Velásquez e Sánchez (2021). O I_{ZLT} , definido como taxa de infiltração inicial ou fluxo de fundo estacionário, pode ser aproximado pela precipitação média de semanas ou meses anteriores a precipitação considera nas análises (BAUM; GODT; SAVAGE, 2010). Marin, Velasquez e Sánchez (2021), utilizou a precipitação acumulada 30 dias anterior ao evento modelado para estimar o I_{ZLT} . Essa metodologia foi adota no atual estudo para estimar esse parâmetro.

A umidade volumétrica saturada (Θ_s), a umidade volumétrica residual (Θ_r) e o parâmetro de ajuste (α), foram extraídos do ajuste da curva característica do solo por meio do modelo proposto por Gardner (1958). Esse modelo foi desenvolvido para solos unimodais, e, conseqüentemente, não se ajusta as curvas bimodais obtidas nos ensaios realizados. Desta forma, optou-se por ajustar o primeiro trecho da curva, incluindo o primeiro ponto de entrada de ar, referente a dessaturação da macroestrutura do solo. Devido o formato bimodal, as curvas características utilizadas na modelagem também foram ajustadas pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004). Esse modelo é mais adequado para ajustar curvas características com esse formato.

Para a realização das análises de suscetibilidade utilizando o TRIGRS, foram elaborados dois Cenários, denominados A e B. No Cenário A, foram realizadas análises considerando a área de estudo completa, além disso os parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados são constantes em toda área, definidos por meio da média dos parâmetros definidos na área. Metodologia semelhante foi utilizada por Fernandes et al. (2001); Zaindan e Fernandes (2009); Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010); Listo e Viera (2012); Park, Nikhil e Lee (2013); Michel et al. (2014); Listo e Vieira (2015); Vieira et al. (2018) e Ávila et al. (2020).

No Cenário B foi considerada apenas uma parcela da área de estudo, especificadamente, o local com maior concentração de pesquisas, devido a isso, os parâmetros utilizados são especializados por meio de zona de propriedades geotécnicas definidas com base nas propriedades do solo. Metodologia semelhante foi utilizada por Viet (2017). O mapa apresentado na Figura 64, distingue a área utilizada nas análises do Cenário A e B. Essas áreas possuem aproximadamente 6,16 e 1,60 km² respectivamente.

Figura 64 - Mapa de localização das áreas analisadas no Cenário A e B.



Fonte: O Autor (2022).

Em cada cenário foi estabelecido dois tipos básicos de análise, designadas de SAT e NSAT. As análises do tipo SAT utilizam o modelo de infiltração inicial saturada, esse modelo de infiltração é utilizado nos estudos de caso realizados por Salciarini et al. (2006); Godt et al. (2008); Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010); Park, Nikhil e Lee (2013) e Ávila et al. (2020). As análises do tipo NSAT utilizam o modelo de infiltração inicial não saturada, esse modelo de infiltração é utilizado nos estudos de caso realizados por Baum, Godt e Savage (2010); Viet (2017) e Marin, Velasquez e Sánchez (2021). Fisicamente, as análises do tipo SAT, visa simular um período de chuvas intensas, precedida pela ocorrência de precipitações que contribuíram para a saturação do solo. As análises do tipo NSAT representam um período de chuvas intensas antecedido por uma temporada mais seca.

Além disso, foram consideradas três profundidades máxima do solo (Z_{max}), assumidas como uniforme para todos os cenários analisados, iguais a 1,0m, 2,0m e 3,0m de profundidade. Devido a complexidade para definir a variação do Z_{max} , outros autores também consideram que este é uniforme, entre eles: Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010); Park, Nikhil e Lee (2013); Listo e Viera (2015) e Vieira et al. (2018). Além disso, essa variação visa analisar a influência da profundidade do solo no cálculo da poropressão e do FS, além de tentar verificar as possíveis profundidades das superfícies de ruptura.

Esses valores foram determinados com base em quatro critérios: i) a profundidade da coleta de amostras indeformadas para a determinação dos parâmetros geotécnicos na área de estudo (que ocorreu entre 0,00-1,00 m); ii) o resultado de sondagens SPT, pois na área de estudo as camadas superficiais (entre 0 e 5 metros) apresentaram baixa resistência a penetração (N_{SPT} variando entre 1 e 5); iii) a variação de teor de umidade no perfil medidas pelas PCDs geotécnicas (entre 0 e 3 metros); iv) ademais, segundo Gusmão et al. (1997) e Lima (2002), a maioria dos deslizamentos que ocorrem nas encostas da RMR são translacionais rasos com até 3m de profundidade.

As sondagens realizadas na área de estudo também não identificaram a presença de um nível de água em nenhuma das profundidades inspecionadas, desse modo, foi assumido que o nível de água inicial se encontra na mesma profundidade do Z_{max} , conforme sugerido por Kim et al. (2010); Park, Nikhil e Lee (2013) e Viet et al. (2017). A Figura 65 apresenta o esquema utilizado para a realização das análises

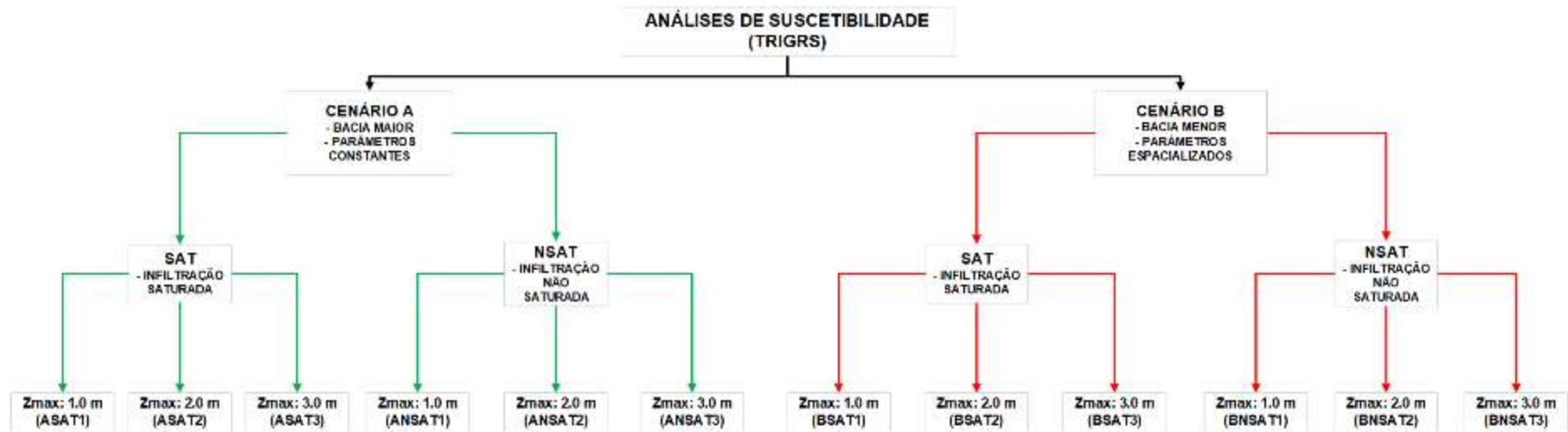
de suscetibilidade com o TRIGRS. Ao todo, serão realizadas 12 análises, cada uma possuindo um código próprio, composto por cinco caracteres que indicam o cenário, o tipo da análise e a profundidade do Z_{max} .

Após a etapa de modelagem, cada uma das análises foram validadas por meio do método LR_{class} , conforme o apresentado no item 3.6. Nesse estudo, será validado o primeiro dia mais crítico de cada análise. É considerado crítico o primeiro dia que apresentar a maior porcentagem de área com $FS \leq 1,00$. Devido as análises realizadas considerarem um evento pluviométrico crítico, superior a media mensal, o processo de validação incluiu as ocorrências registradas após o ano de elaboração do MDT, 2016, e o ano do evento pluviométrico considerado, 2019, disponibilizados pela Defesa Civil, considerando que tal chuva pode gerar mais áreas instáveis e, conseqüentemente, explicar outros os eventos já ocorridos. Metodologia semelhante foi utilizada por Salciarini et al. (2006) que utilizou um inventário com deslizamentos desencandados por diversas chuvas para validar os mapas de suscetibilidades gerados.

O evento pluviométrico usado na modelagem, ocorreu no período entre 11 e 20 de junho de 2019 e acumulou nesse intervalo 361,07 mm. Esse mês apresentou o maior número de ocorrências mensais no período entre 2014 e 2020, registrando 82 ocorrências de movimentos de massa. Em segundo lugar, o mês de junho de 2014, acumulou 326,12 mm pelo pluviômetro Alto da Bela Vista, registrando 74 ocorrências de movimentos de massa ao longo de 8 dias (23/06/14 – 30/06/14). Nesse período de 8 dias foi registrado um acumulado de 214,10 mm. Sendo registrado no dia 26/06/14 uma chuva de 152,21 mm pelo pluviômetro Alto da Bela Vista, alcançando 30,55 mm/h entre às 08:01 – 09:00 h.

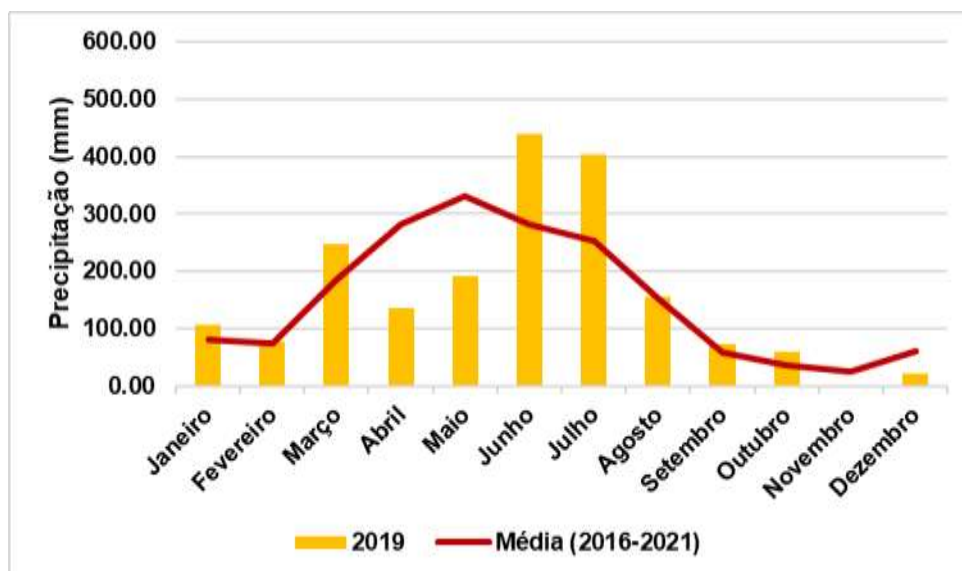
Os registros do pluviômetro Ibura, mostra que em junho de 2019, choveu 439,22 mm, ultrapassando a média do mês que corresponde a 282,68 mm, considerando o período entre 2016 e 2021. Em porcentagem, a chuva de junho de 2019 foi 55,38% superior à média do mês. A Figura 66 apresenta a precipitação mensal do ano de 2019 e a média mensal do período compreendido entre 2016 e 2021.

Figura 65 - Esquema das análises de suscetibilidade realizadas.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 66 - Precipitações mensais do ano de 2019 e a média mensal do período entre 2016 e 2021 registrado pelo pluviômetro Ibura.



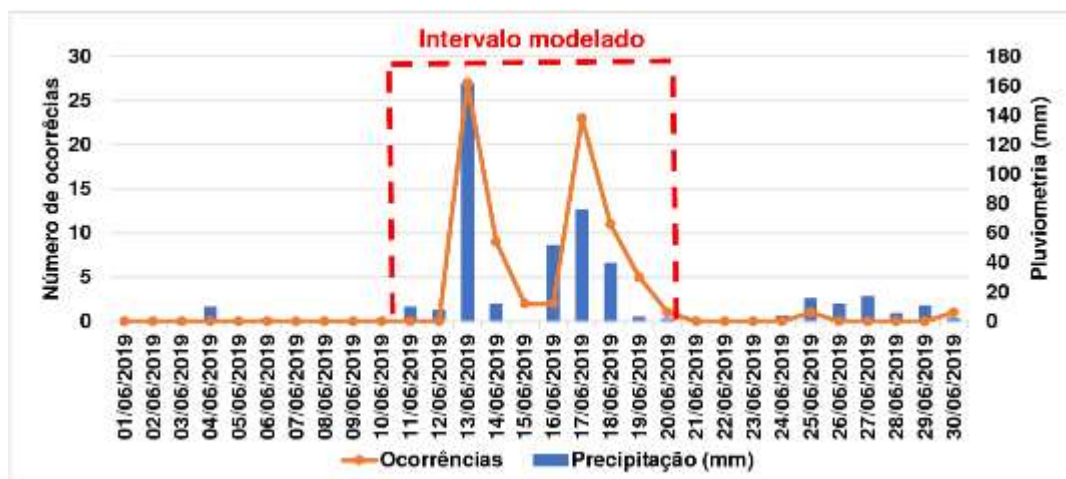
Fonte: O Autor (2022).

A chuva acumulada nesse intervalo representa 82,21% da chuva mensal, sendo em porcentagem 27,73% superior à média do mês. A Figura 67, mostra que entre os 10 dias considerados, os dias 13/06 e 17/06 apresentam as maiores precipitações diárias.

O dia 13/06, acumulou 161,53mm, o que equivale a 36,78% da chuva mensal, sendo classificada como chuva excessiva de limiar 3 (precipitação acumulada em 24h > 150 mm), de acordo com os critérios de Previsões probabilísticas do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (BRASIL, 2021). O dia 17/06, acumulou 75,53mm, o que representa 17,20% da chuva mensal, sendo classificada como chuva excessiva de limiar 1 (precipitação acumulada em 24h > 50 mm), de acordo com os critérios do CPTEC (BRASIL, 2021).

Nesse mesmo período (13/06-20/06), foi registrada a ocorrência de 80 deslizamentos dentro da área de estudo, de acordo com o exposto na Figura 67. Esse número corresponde a 98% do total registrado no mês de junho de 2019.

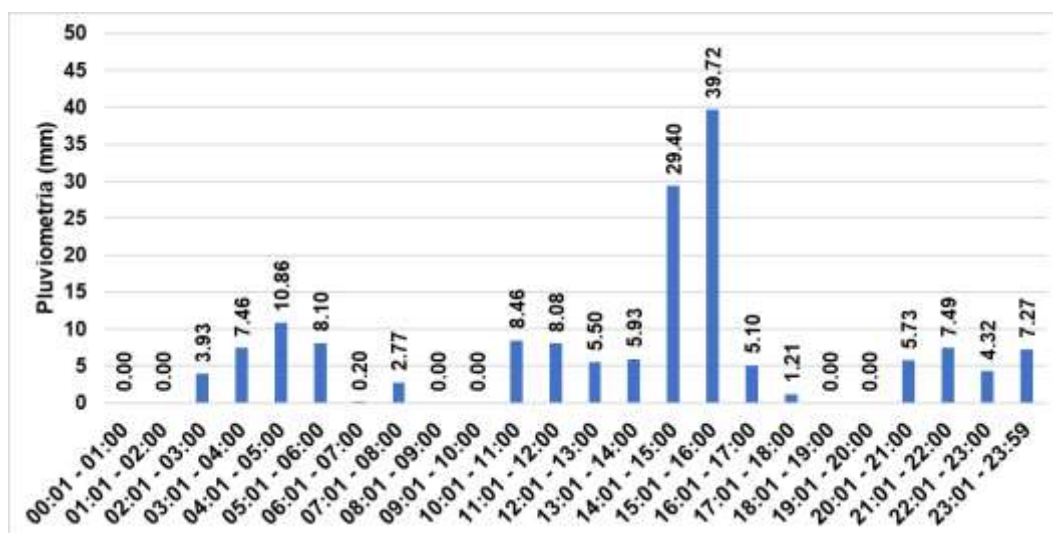
Figura 67 - Distribuição das ocorrências de deslizamentos e pluviometria diária de junho de 2019.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 68, mostra a chuva horária do dia 13/06/2019, a mesma apresentou intensidade média de 6,73 mm/h. O gráfico mostra que entre as 02:01 – 08:00h, choveu 33,32 mm/h, representando 20,63% da chuva diária total. Entre as 10:01 – 18:00h, choveu 103,40 mm/h, representando 64,01% da chuva diária total. No período entre as 20:01 – 23:59h, choveu 24,81 mm/h, representando 15,36% da chuva diária total. Entre as 14:01 – 16:00h, foi acumulado 69,12mm, sendo que 63,22mm, que corresponde a 40% da chuva diária total, transcorreu no intervalo de 1h (14:30-15:30). Esse valor classifica a chuva analisada como intensa (precipitação acumulada em 1h ≥ 30 mm), de acordo com os critérios de Previsões probabilísticas do CPTEC (BRASIL, 2021).

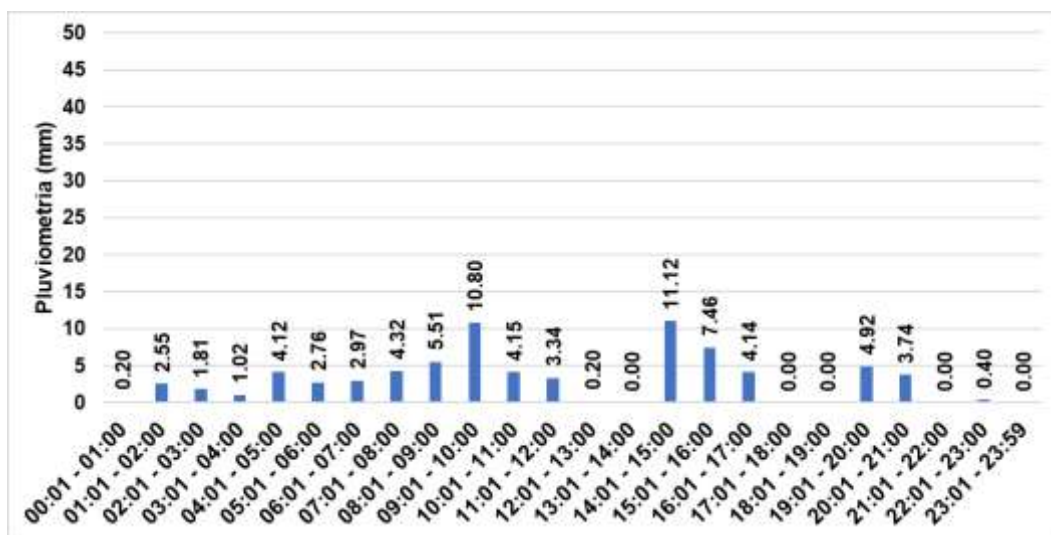
Figura 68 - Chuva horária do dia 13/06/2019 aferida pelo pluviômetro Ibura.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 69, mostra a chuva de modo horário do dia 17/06/2019, a mesma apresentou intensidade média de 3,15 mm/h. O gráfico mostra que entre as 00:01 – 13:00h, choveu 43,75 mm/h, representando 57,92% da chuva diária total. Entre as 14:01 – 17:00h, choveu 22,72 mm/h, representando 30,08% da chuva diária total. No periodo entre as 19:01 – 23:00h, choveu 9,06 mm/h, representando 12,00% da chuva diária total. Entre as 14:40-15:40, foi acumulado 18,19 mm, que corresponde a 24,08% da chuva diária total.

Figura 69 - Chuva horária do dia 17/06/2019 aferida pelo pluviômetro Ibura.



Fonte: O Autor (2022).

Os dados pluviométricos do intervalo modelado, indicam que o mesmo corresponde a um período de chuvas excessivas e intensas, superior a média calculada para mês de junho, considerando o periodo entre 2016-2021. Consequentemente, os mapas de suscetibilidade a deslizamentos gerados, representam essa situação, ou seja, suscetibilidade a deslizamentos rasos diante um cenário de chuvas excessivas e intensas.

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Esse capítulo se encontra dividido conceitualmente em duas partes. A primeira visa apresentar as metodologias utilizadas na investigação geológica-geotécnica. A segunda parte tem como objetivo apresentar a metodologia aplicadas no desenvolvimento das análises de suscetibilidade. As metodologias utilizadas na investigação geológica-geotécnica foram realizadas em quatro etapas: coleta de informações prévias, investigação de campo, ensaios de laboratório e instrumentação.

A coleta de informações prévias de acordo com sub-item 4.1 da ABNT NBR 11682 (2009), possui caráter obrigatório e visa obter informações básicas do local analisado como topografia, geologia e dados geotécnicos. Nesse estudo a maioria dos dados coletados ocorreu por meio da consulta a estudos prévios realizados pelo GEGEP/UFPE.

Com o intuito de complementar as informações dos estudos prévios foi realizado uma investigação geológica-geotécnica mais detalhada no ponto P-11. Nesse local foram realizadas as seguintes atividades: coleta de amostra indeformada do tipo bloco, realização de sondagem SPT, determinação da condutividade hidráulica do solo mediante a utilização do permeâmetro de Guelph e ensaios de laboratório incluindo a definição de parâmetros de resistência, compressibilidade do solo e a curva característica.

Além dos ensaios de campo e laboratório tradicionais, adicionou-se a isso as PCDs Geotécnicas, que visam monitorar áreas de risco. Elas são compostas por um pluviômetro; data logger responsável por disponibilizar os dados coletados na rede e por uma sonda com sensores de umidade. Nesse estudo, as sondas instaladas possuem uma haste com 3 metros de profundidade com sensores instalados no seu comprimento a cada meio metro, totalizando 6 sensores por sonda. Esses sensores tem a função de medir a variação da umidade em profundidade.

Para a realização das análises de suscetibilidade utilizando o TRIGRS, foram elaborados dois cenários, denominados A e B. No cenário A, foram realizadas análises considerando a área de estudo completa, além disso os parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados são constantes em toda a bacia. Porém, no cenário B é considerado apenas uma parcela da área de estudo, especificadamente no local com maior concentração de pesquisas, devido a isso, os parâmetros utilizados são especializados, sendo definindo assim mais de uma zona de propriedades físicas.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Este capítulo apresenta e analisa os resultados da caracterização geotécnica realizada e está dividido em três seções principais. A primeira seção visa apresentar os resultados da investigação geotécnica realizada em campo. A segunda trata de expor os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório. A terceira e última seção apresenta os resultados das PCDs Geotécnicas instalada na área de estudo, cujo objetivo é determinar variação sazonal da umidade do solo de modo automático.

6.1 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO

Neste item serão apresentados os resultados da investigação geotécnica de campo, sendo dividida: em sondagens a trado manual e SPT e o ensaio realizados de determinação da condutividade hidráulica por meio do permeâmetro de Guelph.

6.1.1 Sondagens a trado manual e SPT

Nesta seção serão apresentados os resultados das sondagens realizadas a trado manual e sondagens de simples reconhecimento com SPT.

6.1.1.1 Sondagem de simples reconhecimento com trado manual

As análises táteis-visuais das amostras indicam que o substrato dos pontos estudados pertence à Formação Barreiras, sendo composto por sedimentos areno-siltico-argilosos, de canal fluvial, típicos de depósitos por enxurradas, apresentando diferenças de coloração conforme o observado por Santana (2006), variando de vermelhas escuras, amareladas, róseas até brancas (MEIRA, 2008).

Através das amostras coletadas por meio do trado, foi possível realizar a definição da umidade gravimétrica e volumétrica de campo, em maio de 2019, disposta na Tabela 35. E também a ordenação e a caracterização física das camadas de solo, cujos resultados são apresentados no item 6.2.1.

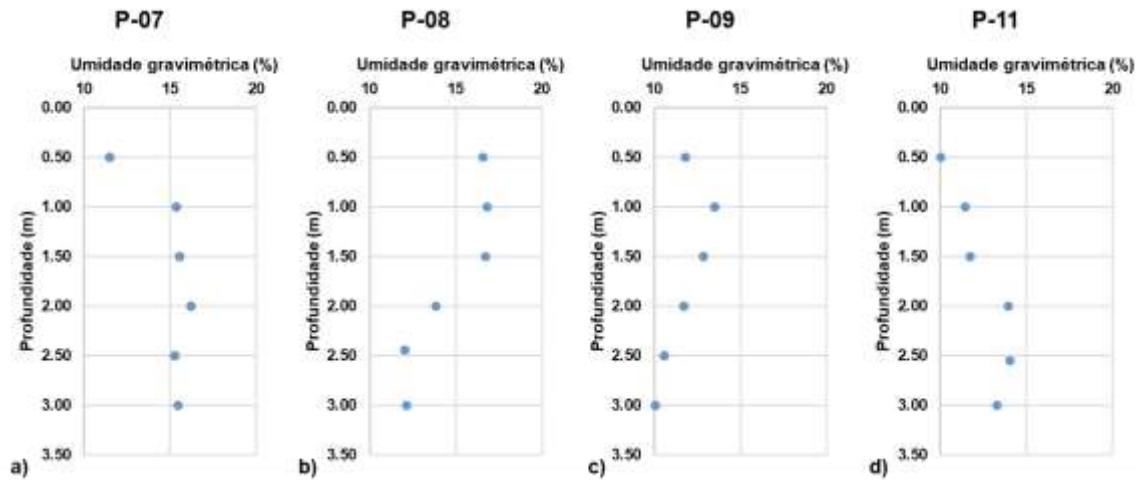
Tabela 35 - Umidade gravimétrica das amostras de solo coletadas por meio de sondagem manual a trado.

Pontos de estudo	Data de coleta	Identificação da amostra	Prof. (m)	W (%)	θ (%)
P-07	10/05/2019	AMP07.1	0,0 – 0,5	11,51	20,50
		AMP07.2	0,5 – 1,0	15,38	26,98
		AMP07.3	1,0 – 1,5	15,55	27,72
		AMP07.4	1,5 – 2,0	16,21	27,62
		AMP07.5	2,0 – 2,5	15,26	27,19
		AMP07.6	2,5 – 3,0	15,47	28,12
P-08	11/05/2019	AMP08.1	0,0 – 0,5	16,58	26,33
		AMP08.2	0,5 – 1,0	16,81	28,23
		AMP08.3	1,0 – 1,5	16,72	28,08
		AMP08.4	1,5 – 2,0	13,85	20,82
		AMP08.5	2,0 – 2,5	12,06	20,30
		AMP08.6	2,5 – 3,0	12,14	20,44
P-09	16/05/2019	AMP09.1	0,0 – 0,5	11,79	22,12
		AMP09.2	0,5 – 1,0	13,49	24,93
		AMP09.3	1,0 – 1,5	12,86	22,77
		AMP09.4	1,5 – 2,0	11,71	21,17
		AMP09.5	2,0 – 2,5	10,60	20,71
		AMP09.6	2,5 – 3,0	10,05	17,32
P-11	15/05/2019	AMP11.1	0,0 – 0,5	10,84	20,47
		AMP11.2	0,5 – 1,0	11,46	21,52
		AMP11.3	1,0 – 1,5	11,71	21,78
		AMP11.4	1,5 – 2,0	13,96	25,15
		AMP11.5	2,0 – 2,5	14,05	25,11

Fonte: O Autor (2022).

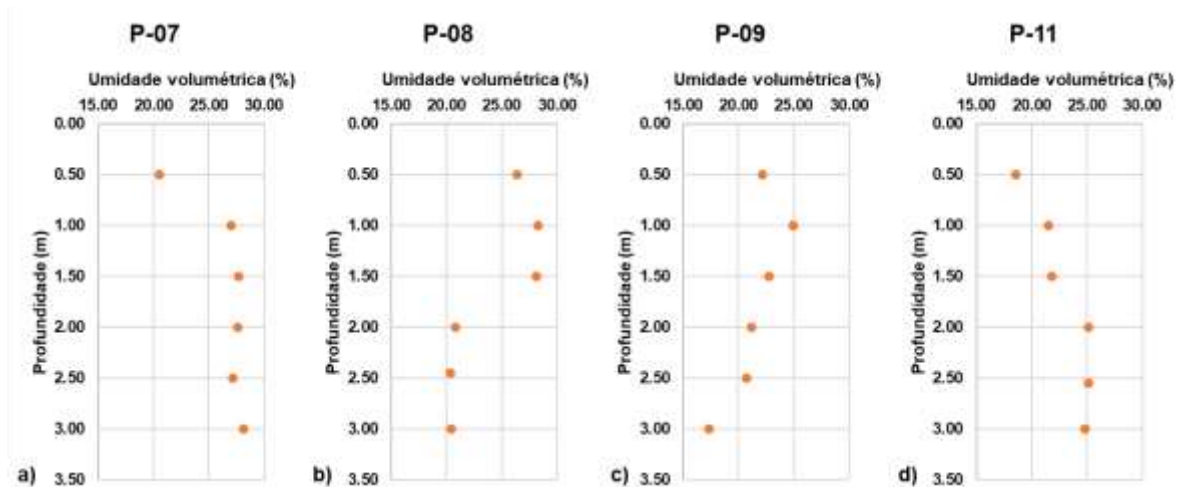
Os dados expostos na Tabela 35 estão apresentadas no formato de perfil de umidade na Figura 70 e Figura 71. A Figura 70 apresenta os perfis de umidade dos pontos P-07, P-08, P-09 e P-11, em umidade gravimétrica. A Figura 71 mostra os mesmos resultados em umidade volumétrica. Os gráficos mostram que a umidade variou entre 10 e 20% em umidade gravimétrica e entre 15 e 30% em umidade volumétrica.

Figura 70 - Perfil de umidade gravimétrica dos pontos a) P-07; b) P-08; c) P-09; d) P-11.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 71 - Perfil de umidade volumétrica dos pontos a) P-07; b) P-08; c) P-09; d) P-11.

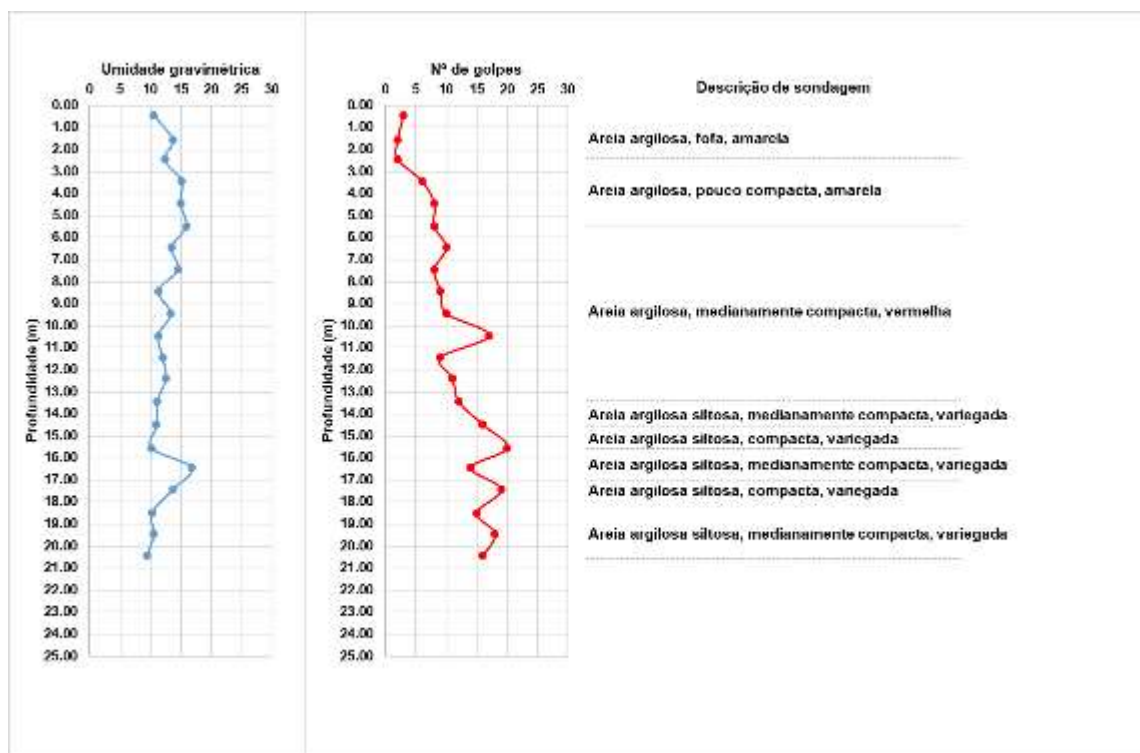


Fonte: O Autor (2022).

6.1.1.2 Sondagem de simples reconhecimento (SPT)

O número de golpes (N_{SPT}), a descrição de cada camada de solo prospectada e o perfil de umidade gravimétrica do solo, determinado em laboratório, estão apresentados na Figura 72.

Figura 72 - Descrição da sondagem SPT e perfil de umidade.



Fonte: O Autor (2022).

Através da análise do perfil de sondagem constata-se que este é predominantemente arenoso e que há decréscimo no número de golpes até 2,40 metros de profundidade, alcançando nesse nível N_{SPT} igual a 2. A partir dessa profundidade verifica-se um aumento contínuo do N_{SPT} até 9,40 metros de profundidade, apresentando valores entre 6 e 10 golpes. Entre 9,40 e 21 metros de profundidade também é constatado um crescimento do número de golpes, intercalado por picos de resistência. Nesse intervalo o N_{SPT} varia entre 10 e 20 golpes.

Com relação ao perfil de umidade também apresentado na Figura 72, é possível observar uma pequena variação de umidade gravimétrica, com valores intercalados entre 10 e 17%. A partir de 16 metros de profundidade é observado um aumento significativo da umidade, devido o procedimento de lavagem que é realizada durante a sondagem, pois não foi identificado nível de água em nenhuma das profundidades inspecionadas. Também não foi identificado nível de água em nenhuma das sondagens realizadas para os estudos de Meira (2008) e Santos (2018).

Esses dados mostram que o perfil analisado apresenta nas camadas iniciais baixa resistência a penetração, fato que o torna suscetível a movimentos gravitacionais de massa. Além disso, destaca-se que esse perfil apresentou

concordância com os perfis investigados por Meira (2008) e Santos (2018), disponíveis no Anexo A. Entre as características que corrobora com a concordância entre os perfis estão: i) perfil predominantemente arenoso; ii) camadas superficiais (entre 0 e 5 metros) com baixa resistência a penetração (N_{SPT} variando entre 1 e 5); e iii) aumento do N_{SPT} com a profundidade.

6.1.2 Permeâmetro de Guelph

No ponto P-11 foi realizado ensaio com o Permeâmetro de Guelph com o intuito de determinar a variação da condutividade hidráulica do solo com a profundidade. Os resultados desse ensaio, incluindo o coeficiente de permeabilidade saturada (K), o potencial mátrico (Φ_m) e a umidade gravimétrica (W) antes e após o ensaio estão disponíveis na Tabela 36.

Tabela 36 - Valores dos coeficientes de permeabilidades saturadas, potenciais mátricos e as umidades iniciais e finais do solo.

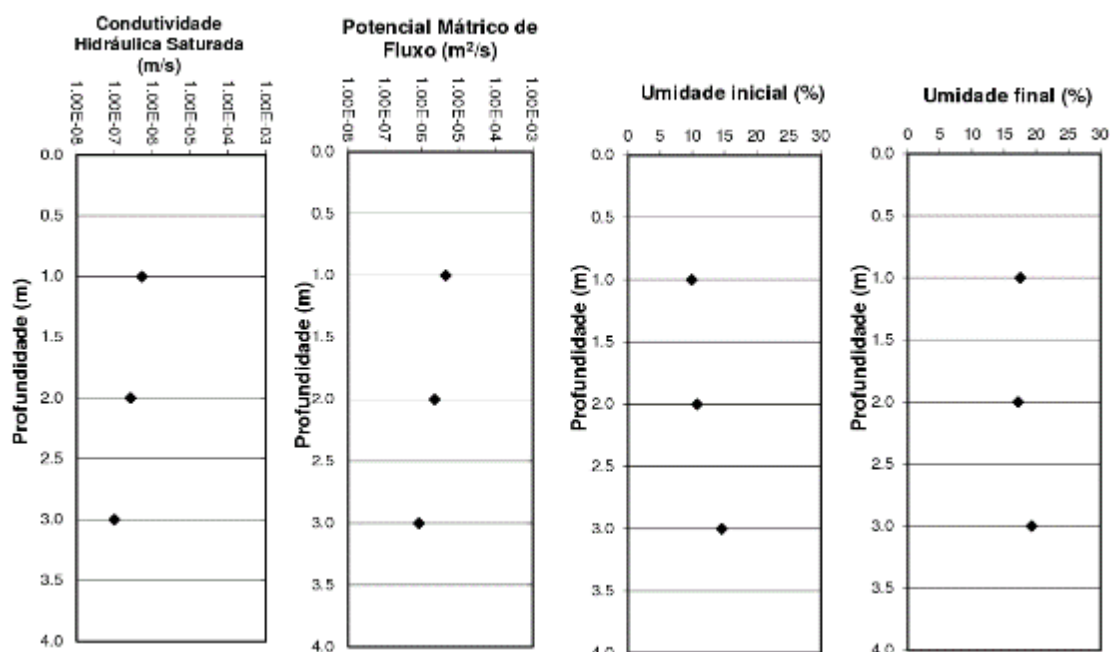
Prof. (m)	K (m/s)	f_m (m ² /s)	$W_{inicial}$ (%)	W_{final} (%)
0,00 – 1,00	5.22×10^{-7}	4.35×10^{-6}	9.85	17.48
1,00 – 2,00	2.61×10^{-7}	2.18×10^{-6}	10.71	17.13
2,00 – 3,00	1.08×10^{-7}	1.08×10^{-6}	14.53	19.25

Fonte: O Autor (2022).

Os dados da Tabela 36 estão apresentados no formato de gráfico na Figura 73. Ao observar o gráfico da condutividade hidráulica é notório que ocorre uma diminuição sutil da permeabilidade com a profundidade. A umidade inicial apresenta um pequeno aumento com a profundidade, devido a umidificação do solo causada pelo próprio ensaio, enquanto que a umidade final é quase uniforme em todo o perfil.

De acordo com a classificação proposta por Terzaghi, Peck e Mesri (1996), os coeficientes de permeabilidade saturada (K), determinados por meio do Permeâmetro de Guelph, classificam esse solo como de baixa permeabilidade, apresentando comportamento típico de solos formados por areias muito finas ou compostos pela mistura de silte, areia e argila. Esse último caso, concorda com os resultados de granulometria apresentados e discutidos no item 6.2.1, pois apesar de serem predominantemente arenoso, os solos estudados também ostentam uma parcela considerável de finos (silte e argila).

Figura 73 - Resultados dos coeficientes de permeabilidades obtidas “in situ”, potencial mátrico e umidade inicial e final.



Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 33 mostra os valores dos coeficientes de permeabilidade de pesquisas realizadas na área de estudo, assim como os resultados do atual estudo. Os resultados se mostraram dentro da faixa de valores esperados para solos da Formação Barreiras, ou seja, variando entre 10^{-5} a 10^{-7} m/s, conforme o apontado por Coutinho e Severo (2009). Segundo esses mesmos autores, a variação dos resultados depende dos teores mais argilosos ou arenosos dos materiais estudados, de modo que, quanto maior a percentagem de finos, menos permeável é o solo.

Tabela 37 - Valores dos coeficientes de permeabilidade de pesquisas realizadas na área de estudo.

Solo	Referência	Local	Ponto	Identificação	Descrição / Classificação	Prof. (m)	Permeabilidade (m/s)		Tipo de Ensaio
							Campo	Laboratório	
Formação Barreiras – Fácies de Canal Fluvial	Santana (2006)	UR-2	P-01	Camada 1	Areia argilosa (SC)	0.5	3.15×10^{-05}	-	Triflex
						1.0	2.86×10^{-05}	-	Triflex
						1.5	2.59×10^{-05}	-	Triflex
				Camada 2	Arg. de baixa plasticidade (CL)	2.0	2.01×10^{-05}	2.12×10^{-05}	Guelph e Triflex
						2.5	1.89×10^{-05}	-	Triflex
						3.5	-	1.45×10^{-06}	Triflex
				Camada 3	Silte de baixa plasticidade (ML)	4.2	-	1.89×10^{-05}	Triflex
	Meira (2008)	UR-2	P-02	-	Areia argilosa (SC)	0.5	1.70×10^{-05}	1.08×10^{-05}	Guelph e Triflex
						1.0	2.78×10^{-05}	1.18×10^{-05}	Guelph e Triflex
						1.5	2.53×10^{-05}	-	Guelph
						2.0	3.16×10^{-05}	-	Guelph
			P-03	-	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0.5	1.76×10^{-05}	1.05×10^{-05}	Guelph e Triflex
						1.0	2.09×10^{-05}	2.30×10^{-05}	Guelph e Triflex
						1.5	2.86×10^{-05}	-	Guelph
						2.0	3.03×10^{-05}	-	Guelph
	Santos (2018)	Lagoa Encantada	P-05	-	Areia siltosa (SM-SC)	1.0	-	6.36×10^{-06}	Triflex
			P-04	-	Areia argilosa (SC)	1.3	-	1.40×10^{-05}	Triflex
	Atual estudo	UR-12	P-11	-	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	1.0	5.22×10^{-07}	-	Guelph
					Areia argilosa (SC)	2.0	2.61×10^{-07}	-	Guelph
						3.0	1.08×10^{-07}	-	Guelph

Fonte: O Autor (2022).

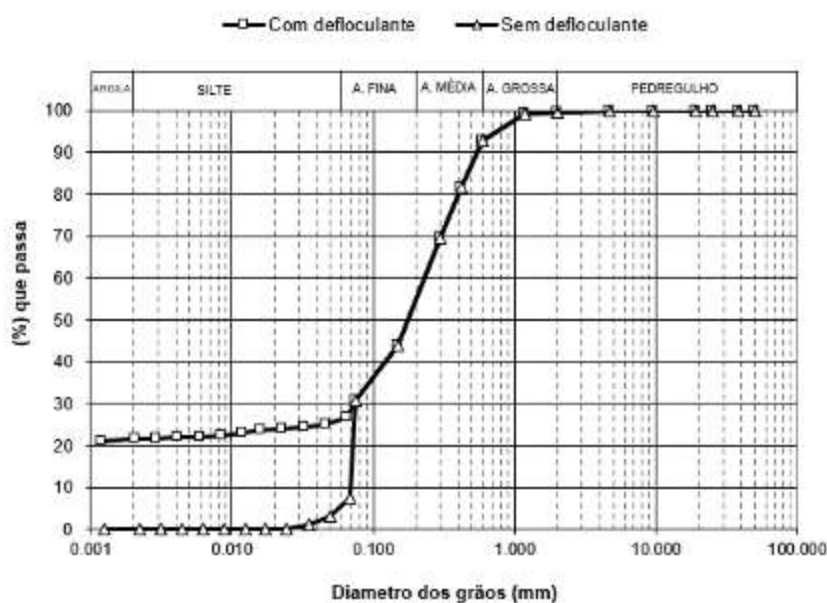
6.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste item serão apresentados os resultados do ensaio de laboratório. Essa seção está dividida em ensaios de granulometria e Limites de Atterberg; ensaio edométrico duplo; ensaio de cisalhamento direto e curva característica.

6.2.1 Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS

A Figura 74 apresenta a curva granulométrica com e sem defloculante do bloco coletado no ponto P-11. Os resultados obtidos por meio das amostras deformadas coletados por meio de trado manual dos pontos P-06, P-07, P-08, P-09, P-10 e P-11 estão dispostos no Apêndice A. Nesta seção é apresentada para cada uma das amostras coletadas a síntese dos resultados dos ensaios de granulometria, incluindo frações de acordo com a escala da ABNT, o peso específico dos grãos, os limites de Atterberg e a Classificação Unificada (SUCS).

Figura 74 - Curvas granulométricas (com e sem defloculante). Prof.: 0,70 a 1,00 m.



Fonte: O Autor (2022).

O ensaio realizado com a aplicação de defloculante mostra que o material analisado é majoritariamente grosso, com menos de 50% passando na peneira #200 (0,0075 mm). A fração areia é predominante e representa 73,03% do percentual total. Desse valor 29,38% corresponde a areia fina, 36,74% representa a parcela de areia média e os 6,91% restantes equivale ao percentual de areia grossa. Das frações remanescentes 21,56% é argila, 5,06% é silte, 0,35% é pedregulho.

O índice de plasticidade (IP) dessa amostra, correspondeu a 5,90. A partir dos resultados da distribuição granulometria e índices de consistência realizou-se a classificação do solo por meio do sistema de classificação unificada (SUCS). Sendo o mesmo classificado como areia silto-argilosa (SM-SC), concordando com os resultados da caracterização obtidos das amostras coletadas por meio do trado na mesma profundidade. O peso específico dos grãos (G_s) obtido foi 2,611 g/cm³. Segundo Silva (2007), os valores de G_s entre 2,5 e 2,7 indica que na fração areia da formação barreiras e solos residuais de granito encontrados na RMR, a mineralogia é composta predominantemente do mineral quartzo.

A atividades das argilas dessa amostra foi estimada por meio do índice de atividade (I_a) proposto por Skempton (1953). Esta se trata da razão entre o índice de plasticidade e a porcentagem da fração de argila menor que 0,002 mm. O I_a resultou em 0,27, classificando o solo como inativo, indicando assim, a inexistência de minerais argílicos do tipo expansivo. Além disso, a maior quantidade de finos (silte e argila) nos resultados do ensaio realizado com defloculante em comparação ao ensaio sem o uso dessa substância mostram que a argila se encontra agregada no seu estado natural, devido as propriedades cimentantes do óxido de ferro e do óxido de alumínio. Isso ocorre porque o defloculante age neutralizando as cargas elétricas dessas partículas desfazendo as macroestruturas, que sinalizam uma falsa ausência de argila como indicado no ensaio sem defloculante.

Através dos resultados dos ensaios realizados com e sem defloculante é possível calcular a razão de dispersão dos solos (RD), esta trata-se da razão entre os percentuais de argila dos ensaios realizados com e sem defloculante, expressa em termos percentuais, normatizada pela ABNT NBR 13602 (2020). Vários autores apresentaram propostas que correlacionam a razão de dispersão com o potencial de erodibilidade dos solos. Araújo (2000), por exemplo, estabeleceu um critério de avaliação da erodibilidade, dividido em três classes com base nos resultados da RD: médio ($RD < 25\%$); alto ($25\% > RD < 50\%$) e muito alta ($RD > 50\%$). O RD do solo em estudo apresentou um resultado igual a 12,50%, indicando, segundo a classificação utilizada, que a área de estudo apresenta suscetibilidade média a processos erosivos.

A Tabela 38 apresenta faixas de valores da granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade dos ensaios realizados na área de estudo. De uma forma geral, tais solos foram identificados como pertencentes a fácies de canal fluvial da Formação

Barreiras. Em geral, os solos dessa fáceis são classificadas como areias argilosas e/ou siltosas, inativas, com plasticidade variando de baixa a média (SANTOS, 2018).

Os solos analisados no atual estudo, bem como em estudos anteriores realizados dentro da área de interesse mostram que esse solo, de acordo com a Classificação Unificada (SUCS), são definidos como areias argilosas ou areias argilosas e siltosas. Apresentam plasticidade variando de baixa a média e similaridade entre os percentuais granulométricos.

Tabela 38 – Caracterização de solos da formação barreiras da área de estudo.

Solo	Referência	Ponto	Descrição / Classificação	Prof. (m)	Granulometria			Limites de Atterberg (%)		
					Arg.	Silte	Areia	Pedr.	LL	IP
Formação Barreiras – Fácies de Canal Fluvial	Santana (2006)	P-01	Areia argilosa (SC)	0,00 a 3,30	17 - 20	4 - 13	65 - 67	2 - 6	24 - 29	7 - 12
	Meira (2008)	P-02	Areia argilosa (SC)	0,15 a 1,00	20 - 25	8	66 - 72	0 - 1	25	7 - 8
		P-03	Areia argilosa (SC)	0,15 a 1,00	23 - 29	3 - 8	68 - 69	0	25	8 - 9
	Santos (2018)	P-04	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,70 a 2,70	28	4	67	2	22	7
		P-05	Areia argilosa (SC)	0,70 a 5,70	20 - 33	4 - 5	53 - 61	2	26,0 - NL	9 - NP
	Atual estudo	P-06	Areia argilosa (SC)	0,00 a 3,00	22 - 33	0 - 11	60 - 76	1 - 10	19 - 34	3 - 15
		P-07	Areia argilosa (SC)	0,00 a 3,00	18 - 37	2 - 14	47 - 74	0 - 14	22 - 39	3 - 15
		P-08	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,00 a 3,00	19 - 32	3 - 15	63 - 73	0 - 2	26 - 33	4 - 13
		P-09	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,00 a 3,00	20 - 27	0 - 1	70 - 77	1 - 3	19 - 24	5 - 7
		P-10	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,00 a 3,00	11 - 23	2 - 20	63 - 77	0 - 1	20 - 25	4 - 7
		P-11	Areia argilosa (SC)	0,00 a 3,00	21 - 27	1 - 5	68 - 77	0 - 1	19 - 37	5 - 15

Fonte: O Autor (2022).

6.2.2 Curva Característica

De acordo com a metodologia exposta no item 5.1.3.2, foram realizados ensaios para determinação da curva característica do solo, nos pontos P-07, P-08, P-09 e P-11, por meio da mesa de tensão (sucção entre 0,1 – 1 kPa) e do método do papel filtro (demais sucções).

A umidade gravimétrica foi relacionada com umidade volumétrica por meio da Equação (25).

$$\theta = \frac{w\rho_b}{\rho_w} \quad (25)$$

Em que: θ é o teor volumétrico de água do solo; w é a umidade gravimétrica do solo; ρ_b é o peso específico aparente seco e ρ_w é o peso específico da água.

As curvas características apresentadas nas Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78, exibem comportamento típico de solos com altos teores de material arenoso, caracterizado por apresentar um trecho inicial em que grandes variações de umidade causam pequenas variações da sucção, seguido de outro intervalo, em que pequenas variações de umidade resultam em grandes alterações na sucção do solo.

Além disso, os formatos das curvas são semelhantes a uma “sela”, essa configuração é conhecida como bimodal. Segundo Li, Li e Zhang (2018), a curva característica bimodal se origina de uma estrutura de porosidade dupla. Devido a isso, essas curvas características possuem dois pontos de entrada de ar intercaladas por um trecho relativamente horizontal. O primeiro ponto de entrada de ar é referente a dessaturação da macroestrutura e outro relativo à dessaturação da microestrutura.

Segundo Gitirana Junior, Marinho e Soto (2015), os solos bimodais são formados por diferentes processos genéticos, tais como materiais com distribuições granulométricas descontínuas, estruturas com micro e macroporos formados por agregação física pelo processo de intemperismo, com predominância de lixiviamento do solo, processos biológicos e, no caso de solos compactados, quanto o material é compactado com baixa energia e no ramo seco.

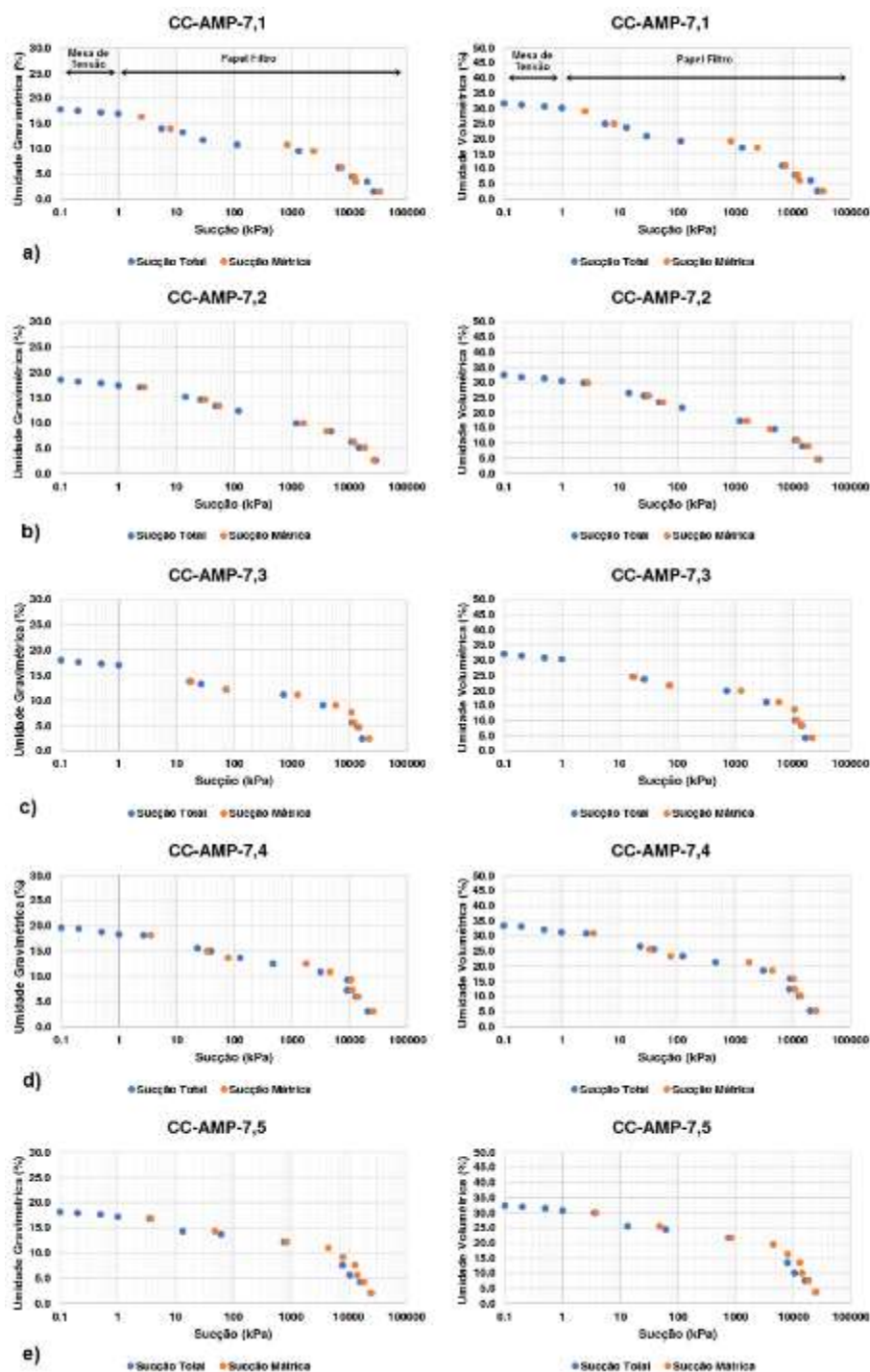
No caso dos solos da formação barreiras, a principal causa de formação de solos bimodais é o intemperismo, pois as partículas do solo tendem a apresentar-se agregadas no seu estado natural, apresentando assim, uma microestrutura bem definida (SILVA, 2007). Curvas características com esse formato foram encontrados

em outros trabalhos realizados dentro e fora da área de estudo na RMR, exemplo: Lafayette (2006), Santana (2006), Silva (2007), Meira (2008), Magalhães (2013), Santos (2018) e Ramos (2019).

Por definição a sucção total é a soma de duas parcelas de sucção, a sucção matricial e a sucção osmótica. Segundo Moncada (2004), a componente matricial está relacionada com a matriz do solo, ou seja, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural. A componente osmótica, está relacionada com a concentração química de solutos da água livre dos poros do solo. A sucção matricial pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, enquanto que a sucção osmótica é geralmente determinada de forma indireta, através da diferença entre a sucção total e a mática.

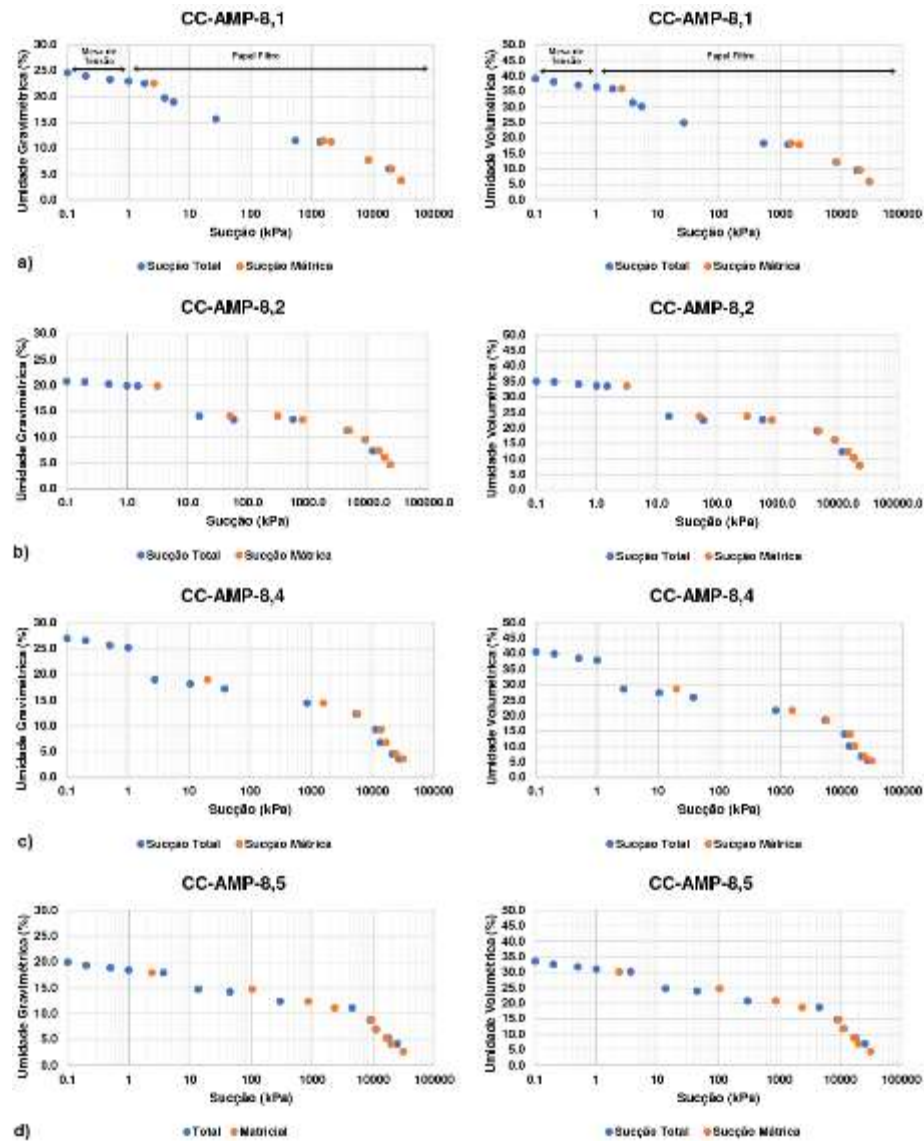
Conforme o apresentado nas curvas características, não foi observado diferença significativa entre a sucção total e a sucção mática, esse resultado indica que a sucção osmótica apresentou pouca influência sobre os solos analisados. Porém, em problemas que envolvem contaminação de solos ou a variações significativas de teor de umidade por evaporação de água, deve-se considerar a influência da sucção osmótica (FERREIRA; OLIVEIRA; GONZÁLEZ, 2015).

Figura 75 - Curvas características do ponto P-7 em umidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 7.1; b) 7.2; c) 7.3; d) 7.4 e e) 7.5.



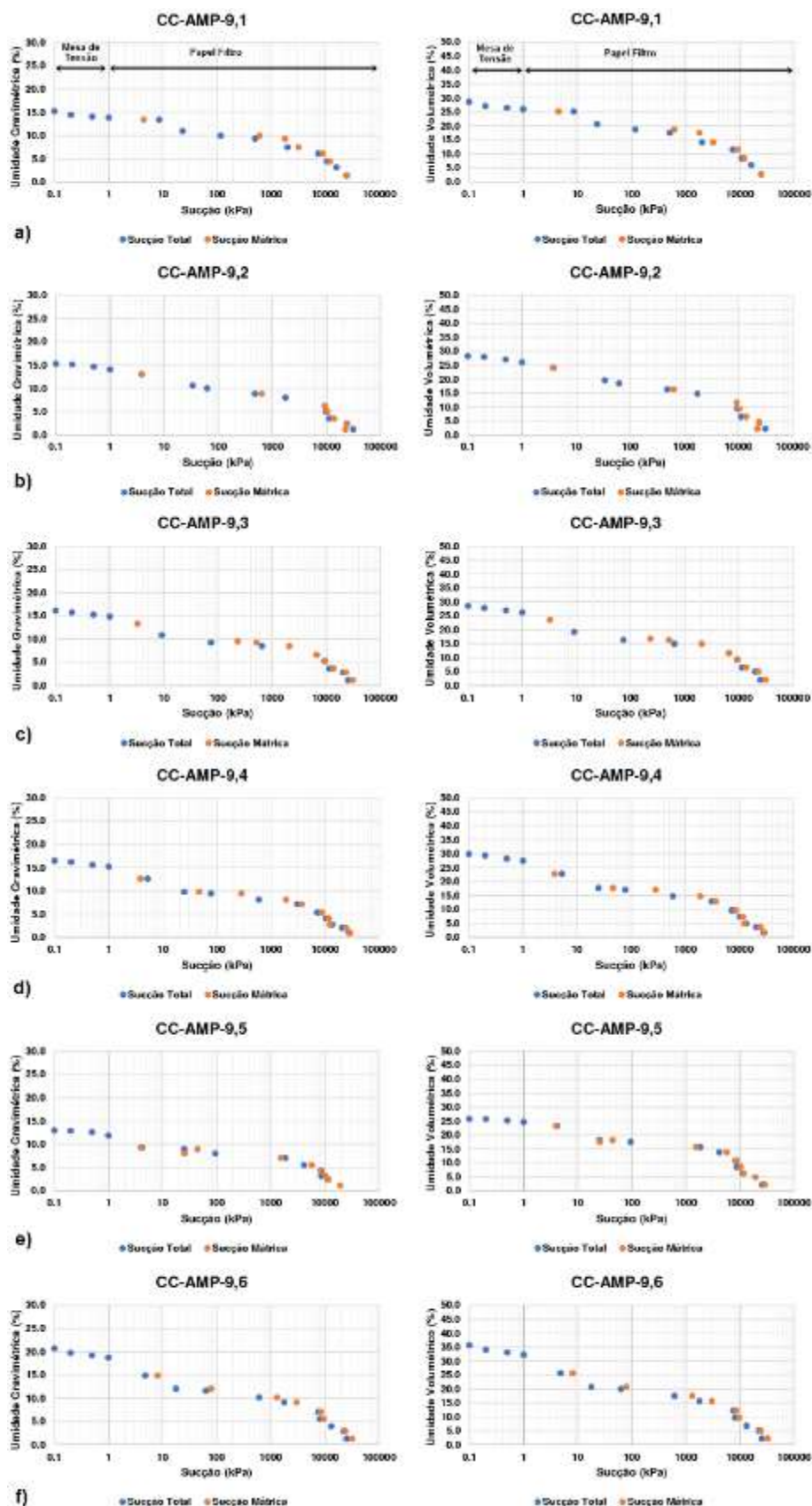
Fonte: O Autor (2022).

Figura 76 - Curvas características do ponto P-8 em umidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 8.1; b) 8.2; c) 8.4 e d) 8.5.



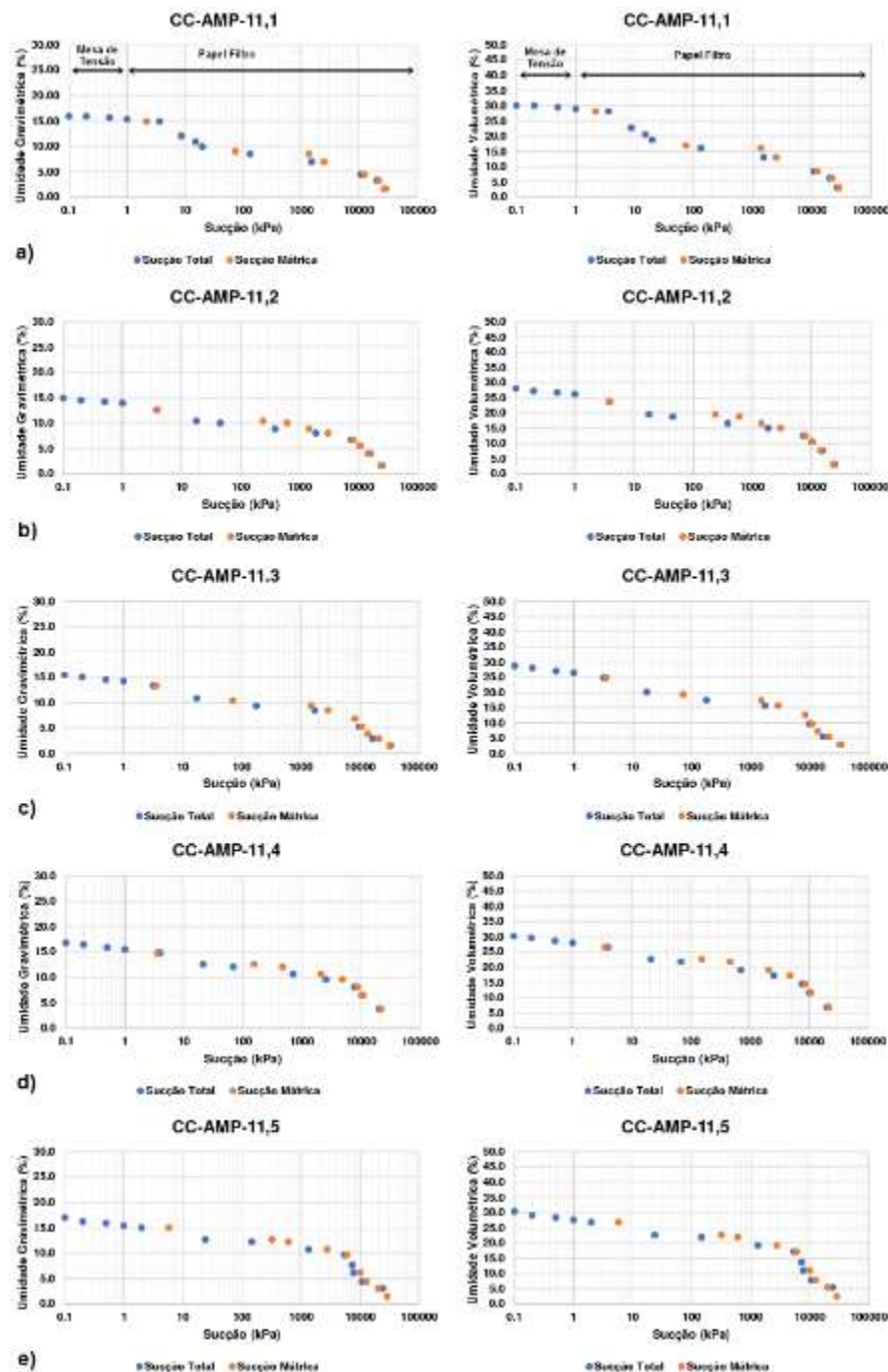
Fonte: O Autor (2022).

Figura 77 - Curvas características do ponto P-9 em unidade gravimétrica vs. sucção e umidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 9.1; b) 9.2; c) 9.3; d) 9.4; e) 9.5 e f) 9.6.



Fonte: O Autor (2022).

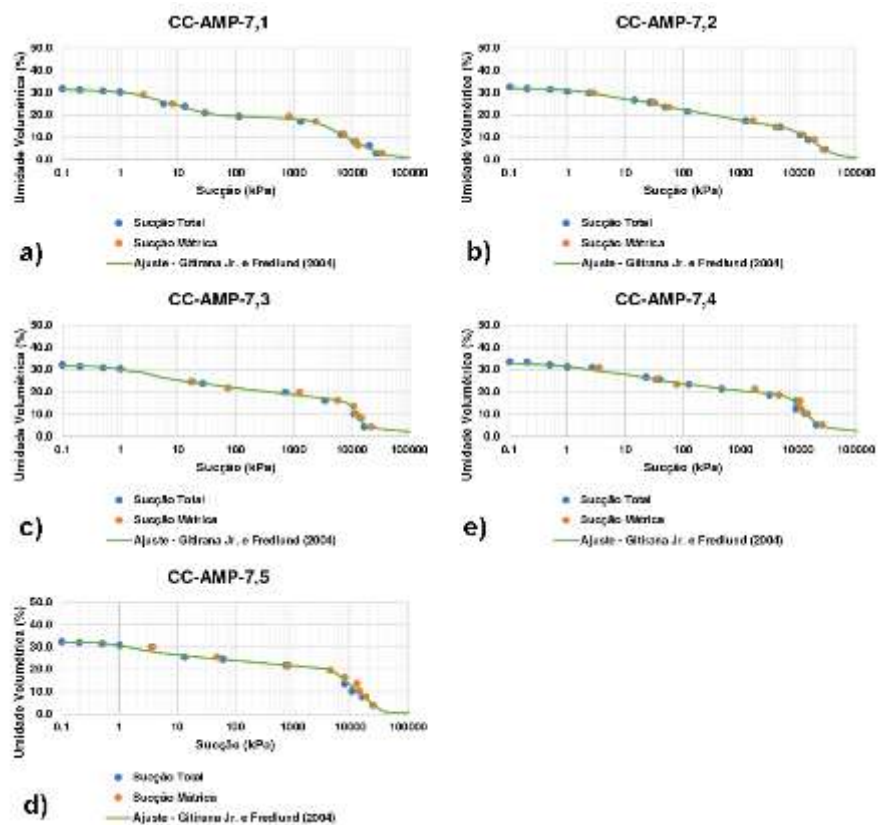
Figura 78 - Curvas características do ponto P-11 em unidade gravimétrica vs. sucção e unidade volumétrica vs. sucção respectivamente, para os pontos: a) 11.1; b) 11.2; c) 11.3; d) 11.4 e e) 11.5.



Fonte: O Autor (2022).

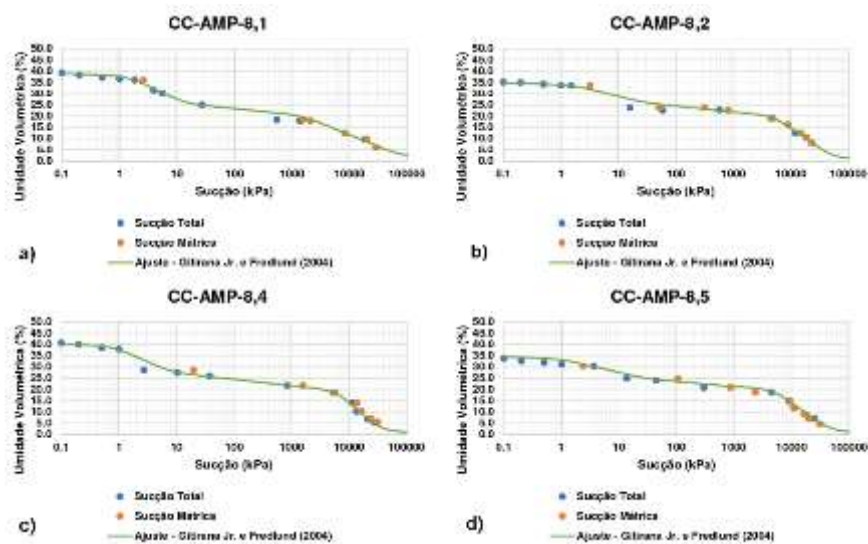
As curvas características dos pontos P-07, P-08, P-09 e P-11, devido ao formato bimodal, foram ajustadas por um modelo adequado para curvas características com esse formato, especificadamente o modelo proposto por Gitirana Junior e Fredlund (2004), conforme o apresentado nas Figura 79, Figura 80, Figura 81 e Figura 82.

Figura 79 - Curvas características do ponto P-7 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 7.1; b) 7.2; c) 7.3; d) 7.4 e e) 7.5.



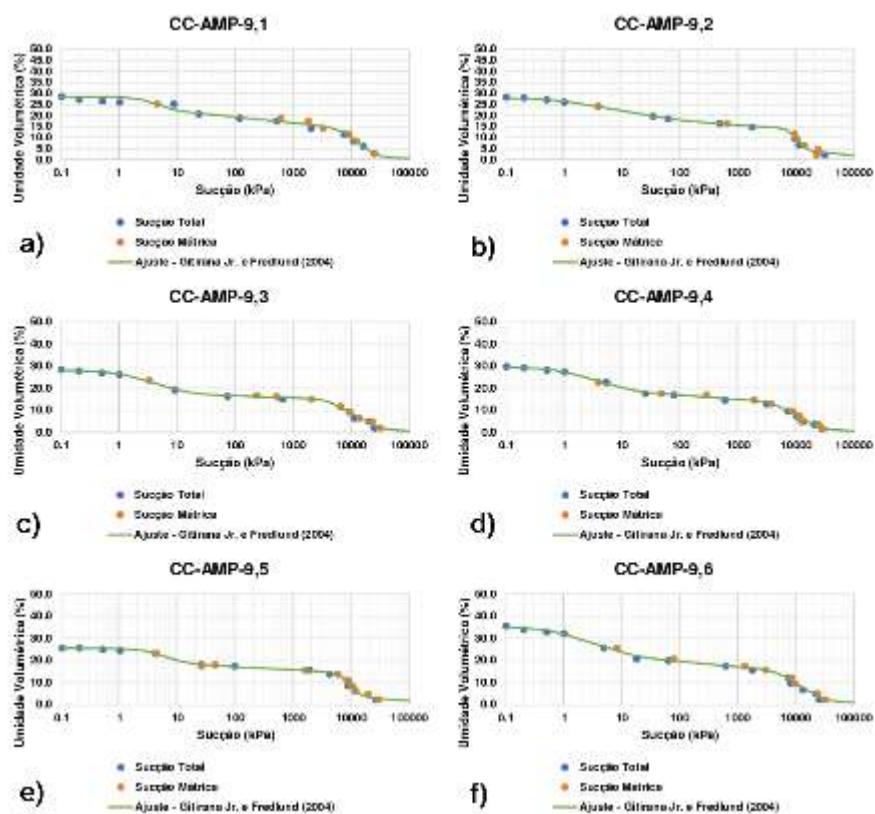
Fonte: O Autor (2022).

Figura 80 - Curvas características do ponto P-8 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 8.1; b) 8.2; c) 8.4 e d) 8.5.



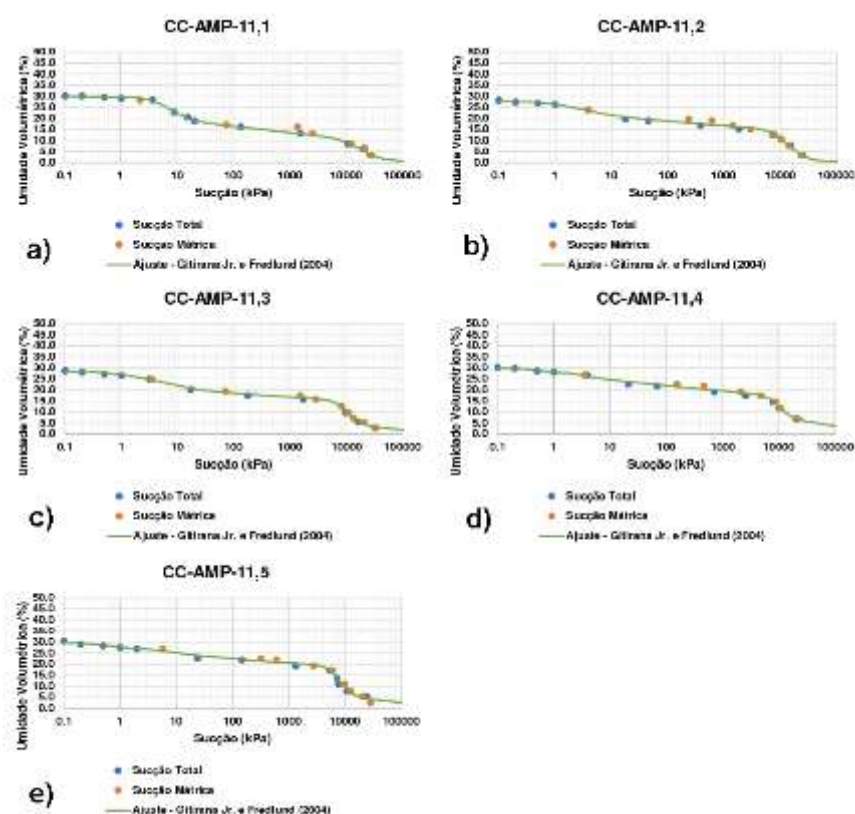
Fonte: O Autor (2022).

Figura 81 - Curvas características do ponto P-9 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 9.1; b) 9.2; c) 9.3; d) 9.4; e) 9.5 e f) 9.6.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 82 - Curvas características do ponto P-11 ajustada pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para os pontos: a) 11.1; b) 11.2; c) 11.3; d) 11.4 e e) 11.5.



Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 39 apresenta os parâmetros de ajuste das curvas características ajustadas pelo modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004), tais como a umidade de saturação, sucção dos pontos de entrada de ar e a sucção referente a umidade residual. De acordo com o disposto, a sucção do primeiro ponto de entrada de ar variou entre 0,62 – 3,72 kPa. Esses resultados estão em conformidade com os estudos realizados nos solos da Formação Barreiras, fácies de canal fluvial, realizados por Lafayette (2006), Santana (2006), Meira (2008), Magalhães (2013) e Santos (2018) que apresentaram valores de entrada de ar variando entre 1,5 e 11,0 kPa.

O valor da sucção residual variou entre 12.000 – 45.000 kPa, a partir desse valor um acréscimo na sucção já não consegue variar o teor de umidade no solo. Esses valores também estão em concordância com os estudos realizados nos solos da Formação Barreiras, realizados por Lafayette (2006), Santana (2006), Meira (2008), Magalhães (2013) e Santos (2018) que apresentaram valores de sucção residual variando entre 15.000 e 40.000 kPa.

Tabela 39 - Parâmetros de ajustes do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) das curvas características dos pontos P-07, P-08, P-09 e P-11.

Amostra	θ_{sat}	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	θ_{res1}	ψ_{b2}	S_b	θ_b	ψ_{res2}	S_{res2}	θ_{res2}	a
CC-AMP-7.1	31,700	1,827	32,021	0,575	18,212	2304,655	0,609	19,308	31558,306	0,010	0,317	0,080
CC-AMP-7.2	32,450	2,343	58,945	0,643	20,878	9023,114	0,457	14,822	38915,923	0,010	0,325	0,080
CC-AMP-7.3	32,040	1,198	2,788	0,811	25,971	10128,515	0,499	15,982	15508,258	0,112	3,598	0,080
CC-AMP-7.4	33,400	1,119	2,595	0,840	28,062	8335,920	0,549	18,337	19622,451	0,111	3,720	0,080
CC-AMP-7.5	32,320	0,622	3,722	0,835	26,984	4741,113	0,624	20,179	35535,156	0,010	0,323	0,030
CC-AMP-8.1	39,160	1,700	12,433	0,604	23,661	1686,125	0,569	22,282	66370,400	0,010	0,392	0,080
CC-AMP-8.2	34,990	2,608	16,411	0,708	24,765	5430,999	0,606	21,219	49093,760	0,010	0,350	0,080
CC-AMP-8.4	40,550	1,039	5,490	0,654	26,517	6494,859	0,508	20,590	33268,900	0,010	0,406	0,080
CC-AMP-8.5	34,990	1,524	18,386	0,664	23,224	5194,772	0,604	21,125	44809,302	0,010	0,350	0,080
CC-AMP-9.1	28,610	2,937	5,632	0,770	22,032	6339,131	0,528	15,109	26193,808	0,010	0,286	0,080
CC-AMP-9.2	28,260	0,940	66,058	0,594	16,777	7338,570	0,516	14,585	14548,680	0,123	3,478	0,062
CC-AMP-9.3	28,500	1,089	14,094	0,568	16,198	4197,023	0,558	15,897	29077,704	0,010	0,285	0,080
CC-AMP-9.4	29,840	0,928	12,536	0,578	17,243	4145,751	0,496	14,792	24080,459	0,010	0,298	0,080
CC-AMP-9.5	25,710	3,325	10,293	0,698	17,940	6268,665	0,585	15,032	13682,666	0,113	2,895	0,080
CC-AMP-9.6	35,700	0,678	14,130	0,557	19,873	4931,463	0,469	16,752	27514,414	0,010	0,357	0,080
CC-AMP-11.1	30,070	3,717	14,868	0,594	17,876	9272,973	0,389	11,700	34912,766	0,010	0,301	0,080
CC-AMP-11.2	28,090	1,220	6,208	0,721	20,243	6659,370	0,559	15,716	28557,186	0,010	0,281	0,080
CC-AMP-11.3	28,720	1,311	17,018	0,644	18,501	6434,316	0,561	16,123	17769,958	0,102	2,927	0,080
CC-AMP-11.4	30,230	0,890	2,492	0,823	24,885	6888,306	0,597	18,056	15233,255	0,203	6,143	0,080
CC-AMP-11.5	30,360	0,792	6,657	0,768	23,323	5042,528	0,656	19,925	12875,842	0,150	4,556	0,080

LEGENDA

θ_{sat}	umidade volumétrica saturada;	ψ_{b2}	sucção do 2º ponto de entrada de ar;	θ_{res2}	umidade volumétrica residual do 2º trecho;
ψ_{b1}	sucção do 1º ponto de entrada de ar;	S_b	grau de saturação do 2º ponto de entrada de ar;	a	parâmetro de ajuste da curva;
ψ_{res1}	sucção residual do 1º trecho;	θ_b	umidade volumétrica do 2º ponto de entrada de ar;		
S_{res1}	grau de saturação residual do 1º trecho;	ψ_{res2}	sucção residual do 2º trecho;		
θ_{res1}	umidade volumétrica residual do 1º trecho;	S_{res2}	grau de saturação residual do 2º trecho;		

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 40 apresenta a estimativa da sucção para as unidades das amostras de solo coletadas em campo, os resultados apresentaram grande variação, indo de 2,35 kPa até 2688 kPa. O método utilizado para estimar as sucções corresponde a relacionar a umidade do solo, determinada em laboratório, com a sucção por meio da curva característica.

Tabela 40 - Estimativa da sucção do solo por meio da umidade de amostras coletadas em campo.

Pontos de estudo	Data de coleta	Identificação da amostra	Curva característica utilizada	Prof. (m)	W (%)	Θ (%)	Ψ (kPa)
P-07	10/05/19	AMP07.1	CC-AMP-7,1	0,0 – 0,5	11,51	20,50	35,16
		AMP07.2	CC-AMP-7,2	0,5 – 1,0	15,38	26,98	10,61
		AMP07.3	CC-AMP-7,3	1,0 – 1,5	15,55	27,72	3,40
		AMP07.4	CC-AMP-7,4	1,5 – 2,0	16,21	27,62	8,63
		AMP07.5	CC-AMP-7,5	2,0 – 2,5	15,26	27,19	5,66
P-08	11/05/19	AMP08.1	CC-AMP-8,1	0,0 – 0,5	16,58	26,33	13,66
		AMP08.2	CC-AMP-8,2	0,5 – 1,0	16,81	28,23	12,36
		AMP08.4	CC-AMP-8,4	1,5 – 2,0	13,85	20,82	2024
		AMP08.5	CC-AMP-8,5	2,0 – 2,5	12,06	20,30	2688
P-09	16/05/19	AMP09.1	CC-AMP-9,1	0,0 – 0,5	11,79	22,12	11,23
		AMP09.2	CC-AMP-9,2	0,5 – 1,0	13,49	24,93	2,35
		AMP09.3	CC-AMP-9,3	1,0 – 1,5	12,86	22,77	3,44
		AMP09.4	CC-AMP-9,4	1,5 – 2,0	11,71	21,17	7,24
		AMP09.5	CC-AMP-9,5	2,0 – 2,5	10,60	20,71	8,02
		AMP09.6	CC-AMP-9,6	2,5 – 3,0	10,05	17,32	775
P-11	15/05/19	AMP11.1	CC-AMP-11,1	0,0 – 0,5	10,04	18,57	24,01
		AMP11.2	CC-AMP-11,2	0,5 – 1,0	11,46	21,52	9,23
		AMP11.3	CC-AMP-11,3	1,0 – 1,5	11,71	21,78	10,73
		AMP11.4	CC-AMP-11,4	1,5 – 2,0	13,96	25,15	6,60
		AMP11.5	CC-AMP-11,5	2,0 – 2,5	14,05	25,11	9,36

Fonte: O Autor (2022).

6.2.3 Ensaio edométrico duplo

Neste item serão apresentados os resultados do ensaio de edométrico duplo, na condição natural (EDN) e inundada (EDI). O comportamento do solo coletado também será avaliado por meio dos parâmetros de compressibilidade e dos tesões de escoamento obtidas. A Tabela 41 ilustra as condições iniciais e finais dos ensaios realizados nas condições de umidade natural e inundada.

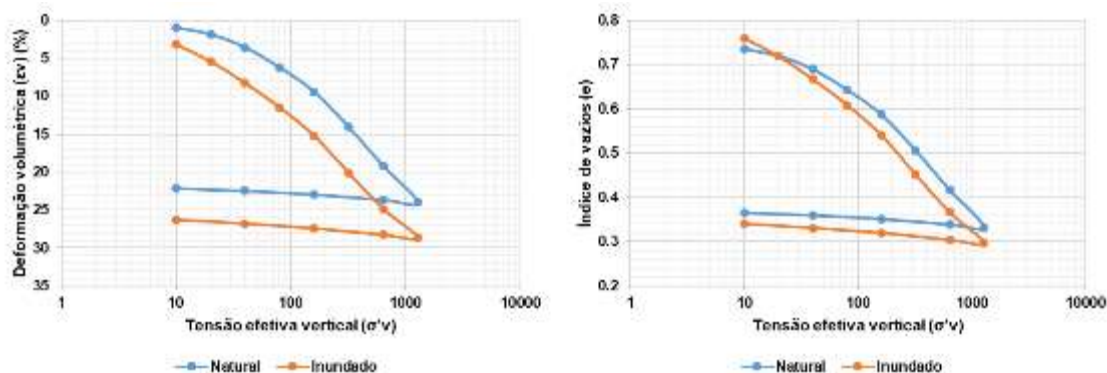
Tabela 41 - Condições iniciais e finais dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

Ponto de estudo	Prof. (m)	Tipo de ensaio	Condições iniciais dos corpos de prova				Condições finais dos corpos de prova		
			W_0 (%)	γ_s (g/cm ³)	e_0	S_0 (%)	W_f (%)	e_f	S_f (%)
P-11	1,0	EDN	9,84	1,49	0,75	34,13	7,11	0,36	50,87
		EDI	9,82	1,44	0,82	31,38	12,76	0,34	97,95

Fonte: O Autor (2022).

Os dados apresentados na Tabela 41, mostra que houve redução de 27,74% na umidade do ensaio realizado na condição natural. Enquanto que o grau de saturação, para esse mesmo caso, aumentou o equivalente a 32,90%, devido a redução do índice de vazios. No ensaio inundado, houve aumento da umidade e elevação do grau de saturação, que resultou em um valor acima de 95%.

A Figura 83 apresenta e compara as curvas de adensamento da condição natural e inundada. No primeiro gráfico é relacionado as deformações volumétricas versus tensão vertical (ε_V versus $\log \sigma_V$), no segundo gráfico é apresentado a variação do índice de vazios com a tensão vertical (e versus $\log \sigma_V$).

Figura 83 - Deformações volumétricas versus tensão vertical (ε_V versus $\log \sigma_V$) e índice de vazios versus a tensão vertical (e versus $\log \sigma_V$).

Fonte: O Autor (2022).

A análise dos gráficos mostra que as curvas de adensamento possuem trecho virgem bem definido. A Tabela 42 apresenta os parâmetros obtidos por meio desse ensaio entre eles: a tensão de escoamento (σ_{vm}) e os parâmetros de compressibilidade (C_c e C_s) nas condições inundada e com a umidade natural do solo.

Tabela 42 - Resumo dos resultados dos ensaios EDI e EDN.

Ponto de estudo	Prof. (m)	Tipo de ensaio	Parâmetros				Parâmetros		
			W_0 (%)	γ_s (g/cm ³)	e_0	S_0 (%)	σ_{vm} (kPa)	C_c	C_s
P-11	1,0	EDN	9,84	1,64	0,75	34,13	72	0,289	0,018
		EDI	9,82	1,58	0,82	31,39	30	0,258	0,023

Fonte: O Autor (2022).

A tensão de escoamento ou pré-adensamento foi determinado pelo método gráfico de Pacheco Silva. Segundo Pinto (2006), o método de Casagrande é o mais difundido internacionalmente. Porém, a definição do raio mínimo da curva de adensamento pode ser difícil e, devido a isso, está sujeita a erros, levando, conseqüentemente, a resultados imprecisos. No caso analisado, a tensão de escoamento para o solo no estado inundado é inferior a tensão de escoamento para o solo na umidade natural, devido a maior rigidez das amostras nesta condição de umidade.

O índice de compressão e de expansão foram determinados por meio da curva e versus $\log \sigma_v$. O índice de compressão (C_c) foi calculado para a reta definida entre $320\text{kPa} < \sigma_{vm} < 1280\text{kPa}$ e o índice de expansão (C_s) para o trecho entre $40\text{kPa} < \sigma_{vm} < 1280\text{kPa}$ na curva de descarregamento. O índice de compressão (C_c) na umidade natural foi superior ao ensaio inundado. Enquanto que o índice de expansão (C_s) foi ligeiramente maior no ensaio inundado que no ensaio natural.

6.2.3.1 Avaliação da colapsibilidade dos solos através dos ensaios edométricos duplos

A suscetibilidade ao colapso do solo foi analisada por meio do ensaio edométrico duplo, utilizando o critério de Reginatto e Ferrero (1973). Nessa metodologia o colapso do solo para uma determinada tensão vertical toma como referência a tensão vertical geostática e a tensão de pré-adensamento nas condições de umidade natural e na condição saturada (VILAR; FERREIRA, 2015).

O critério de Reginatto e Ferrero (1973) utiliza a Equação (26) para avaliação da colapsibilidade.

$$C = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad (26)$$

Em que: σ_{vpn} é a tensão de escoamento do solo na umidade natural; σ_{vps} é a tensão de escoamento do solo inundado e σ_{v0} é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo “in situ”.

De acordo com essa classificação o solo pode ser verdadeiramente colapsível ($\sigma_{vps} < \sigma_{v0}$ e $C < 0$), condicionado ao colapsível ($\sigma_{vps} > \sigma_{v0}$ e $0 < C < 1$) e não colapsível ($\sigma_{vps} = \sigma_{vpn}$ e $C = 0$). A classificação do solo estudado nesta dissertação está apresentada na Tabela 43.

Tabela 43 - Classificação da colapsibilidade do solo segundo Reginatto e Ferrero (1973).

Ponto de estudo	Prof. (m)	σ_{v0} (kPa)	σ_{vpn} (kPa)	σ_{vps} (kPa)	Coefficiente de colapsibilidade	Class. Reginatto e Ferrero (1973)
P-11	1,0	15,76	72,00	30,00	0,25	Condicionado ao colapso

Fonte: O Autor (2022).

Esse resultado foi similar aos encontrados nos estudos realizados por Lafayette (2006), Meira (2008) e Santos (2018) em solos da Formação Barreiras pertencentes a fáceis canal fluvial que também foram classificados como condicionados ao colapso.

O potencial de colapso do solo foi calculado mediante a diferença entre as deformações fornecidas pelas curvas dos ensaios edométricos naturais e inundados, a partir da razão entre a variação de altura do corpo de prova antes e depois da inundação, em percentagem, conforme o expresso na Equação (27)-

$$PC (\%) = (\Delta H / H_i) * 100 \quad (27)$$

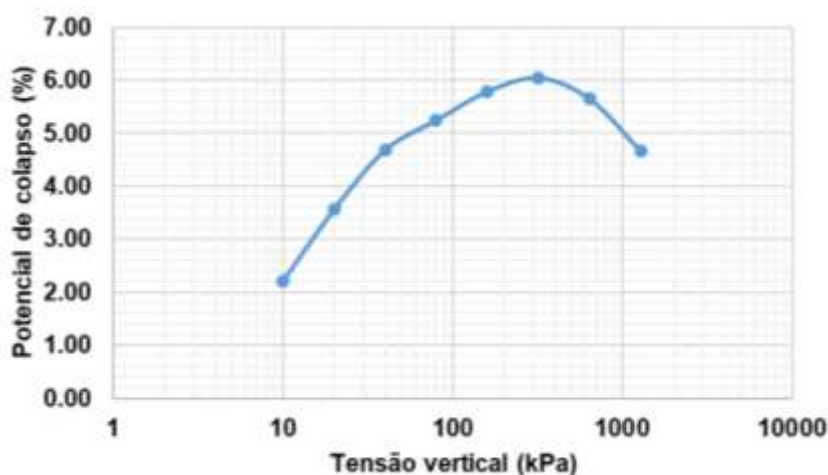
Em que: $PC (\%)$ é o potencial de colapso em percentagem; ΔH é a variação da altura do corpo de prova devido à inundação e H_i é a altura do corpo de prova no início da inundação. A Tabela 44 apresenta os valores de potencial de colapso para cada uma das tensões ensaiadas. Enquanto a Figura 84 mostra as tensões verticais versus o potencial de colapso do solo.

Tabela 44 - Valores dos potenciais de colapso dos ensaios edométricos duplos.

Ponto de estudo	Prof. (m)	Potencial de colapso nas tensões verticais de inundação (%)							
		10 kPa	20 kPa	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	640 kPa	1280 kPa
P-11	1,0	2,20	3,56	4,68	5,25	5,79	6,05	5,65	4,66

Fonte: O Autor (2022).

Figura 84 - Potencial de colapso versus tensão vertical.



Fonte: O Autor (2022).

Através da análise do gráfico constata-se que o potencial de colapso aumenta, até atingir o ponto máximo, referente a 6,05%, na tensão vertical de 320 kPa. Em seguida, é observado uma redução gradativa do potencial de colapso nas demais tensões. Esse resultado classifica o solo como problemático segundo a classificação proposta por Jennings e Knight (1975) e moderando de acordo com a proposta de Lutenegeger e Saber (1988).

Comportamento similar foi encontrado nas amostras de solo ensaiadas nos estudos de Souza (2014) e Santos (2018). Segundo Souza Neto (2004), em solos arenosos, como o analisado nessa dissertação e nos estudos citados, pequenas variações na umidade, provocam grande variação na sucção, sendo esse motivo o necessário para provocar colapso parciais.

6.2.4 Ensaio de cisalhamento direto

De acordo com o descrito no item 5.1.3.4, foram realizados ensaios de cisalhamento direto nas condições de umidade natural e inundada. A Tabela 45 apresenta as condições iniciais de cada corpo de prova utilizado.

Tabela 45 - Condições iniciais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.

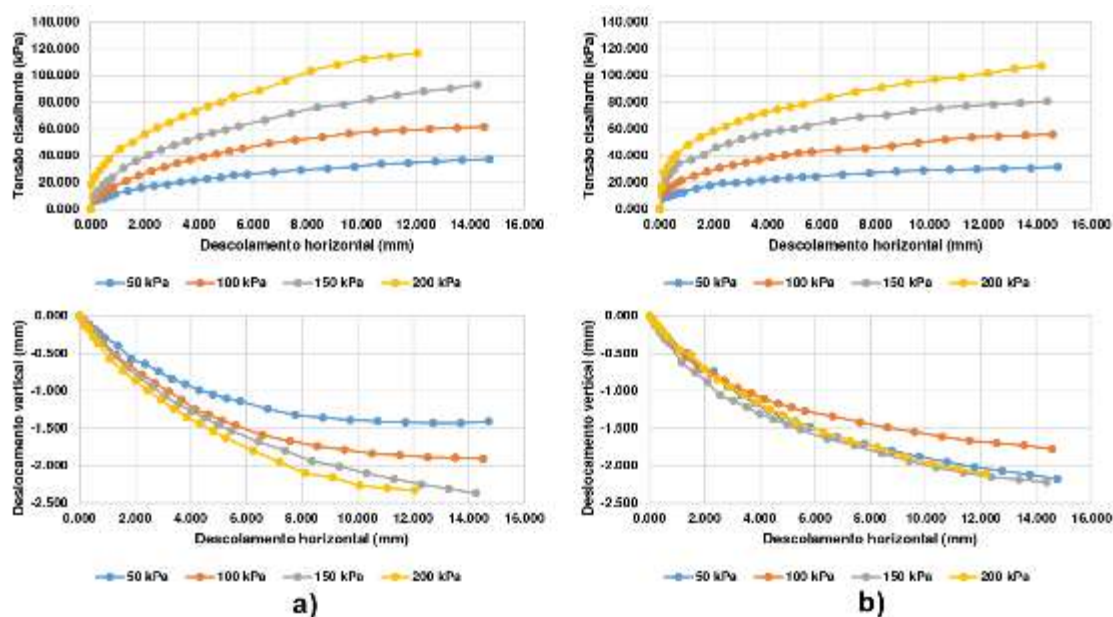
Ponto de estudo	Prof. (m)	Ensaio	CP (nº)	Condição inicial dos corpos de provas				
				σ_n (kPa)	w_0 (%)	γ_s (kN/m ³)	e_0	S_0 (%)
P-11	1,0	CDN	1	50	9,84	13,73	0,87	29,67
			2	100	9,80	13,11	0,95	26,84
			3	150	9,83	13,35	0,92	27,92
			4	200	9,85	13,68	0,87	29,47

		5	50	9,79	14,01	0,83	30,88
1,0	CDI	6	100	9,81	13,19	0,94	27,19
		7	150	9,80	14,76	0,74	34,81
		8	200	9,84	14,26	0,80	32,27

Fonte: O Autor (2022).

A Figura 85 apresenta as curvas da tensão cisalhante (τ) versus o deslocamento horizontal (d_h) e as curvas do deslocamento vertical (d_v) versus o deslocamento horizontal (d_h), concernente aos ensaios de cisalhamento direto realizados nas condições de umidade natural e inundada.

Figura 85 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto, para as condições de umidade: a) natural e b) inundado.



Fonte: O Autor (2022).

As curvas τ vs. d_h para ambas as condições ensaiadas apresentaram aumento da tensão cisalhante conforme o aumento do deslocamento horizontal, não deixando claro o valor máximo alcançado, sendo esse o comportamento típico de um material plástico com enrijecimento. Geralmente solos assim tendem a apresentar rupturas lentas em movimentos de massa (LACERDA, 2004).

Da mesma forma que as curvas τ vs. d_h , as curvas d_h vs. d_v para as duas condições de ensaio foram semelhantes, isto é, apresentaram redução de volume, indicando comportamento característico de compressão para todas as tensões aplicadas. Por fim, Bjerrum, Kringstad e Kummeneje (1961), classifica o

comportamento, apresentado nas curvas τ vs. dh e dh vs. dv como representativo de areias medianamente compactas.

A Tabela 46 mostra as condições dos corpos de prova na ruptura e os parâmetros de resistência.

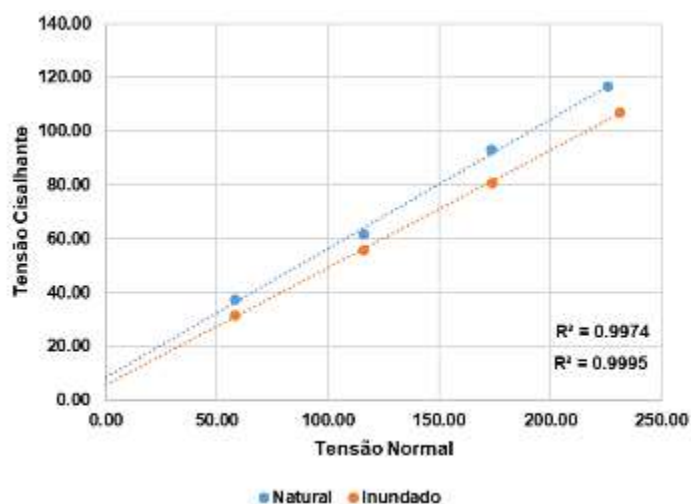
Tabela 46 - Condições dos corpos de prova na ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

Ponto de estudo	Prof. (m)	Ensaio Tipo	CP (nº)	Condição inicial dos corpos de provas				Parâmetros	
				Valores de Pico / Máximo				c' ou c (kPa)	ϕ' ou ϕ (°)
				dh (mm)	dv (mm)	σ_r (kPa)	τ_r (kPa)		
P-11	1,0	CDN	1	14,71	-1,41	58,14	37,34	9,39	28,73
			2	14,51	-1,91	116,04	61,63		
			3	14,26	-2,37	173,57	93,20		
			4	12,05	-2,33	225,93	116,68		
	1,0	CDI	5	14,75	-2,18	58,17	31,66	6,42	25,79
			6	14,56	-1,78	116,10	55,85		
			7	14,36	-2,22	173,77	80,57		
			8	14,15	-2,21	231,15	107,05		

Fonte: O Autor (2022).

A envoltória de resistência obtidas por meio do ensaio de cisalhamento direto na condição natural e inundada está apresentada na Figura 86.

Figura 86 - Envoltória de resistência do ensaio de cisalhamento direto realizado no ponto P-11.



Fonte: O Autor (2022).

O gráfico mostra que as envoltórias de resistência são praticamente paralelas, além disso foi verificado um bom ajuste linear em ambas as condições de ensaio. Na condição natural o ângulo de atrito obtido foi igual a $28,73^\circ$, enquanto que o intercepto de coesão foi igual a 9,39 kPa. Na condição inundada o ângulo de atrito obtido foi igual a $25,79^\circ$ e o intercepto de coesão foi igual a 6,42 kPa. Conforme o esperado, foi observado redução da resistência no ensaio realizado na condição inundada. Os resultados indicam que o intercepto de coesão é o parâmetro mais afetado pela inundação.

A Tabela 47 apresenta os parâmetros de resistência determinado por meio do ensaio de cisalhamento convencional na condição inundada e natural de pesquisas realizadas na área de estudo, viabilizando a comparação dos resultados. De modo geral, os valores encontrados nesse estudo estão em concordância com a faixa de valores apresentados na literatura. Porém, os parâmetros de resistência aqui determinados foram mais próximos aos resultados obtidos por Meira (2008), que apresentou na condição natural coesão variando entre 1,0-4,2 kPa e ângulo de atrito entre $28,11$ - $33,70^\circ$. Enquanto que na condição inundada a coesão variou entre 0.4-3.5 kPa e o ângulo de atrito entre $23,20$ - $28,70^\circ$.

Tabela 47 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do cisalhamento direto nas pesquisas realizadas na área de estudo.

Solo	Referência	Local	Ponto	Identificação	Descrição / Classificação	Prof. (m)	Parâmetros de Resistência			
							Natural		Inundado	
							c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Formação Barreiras – Fácies de Canal Fluvial	Santana (2006)	UR-2	P-01	Camada 1	Areia argilosa (SC)	0,00 a 3,30	20,28	31,80	0,0	36,10
			P-01	Camada 2	Arg. de baixa plasticidade (CL)	3,30 a 3,60	43,57	43,70	0,0	29,00
			P-01	Camada 3	Silte de baixa plasticidade (ML)	3,60 em diante	-	-	8,88	29,40
	Meira (2008)	UR-2	P-02	Bloco 1	Areia argilosa (SC)	0,15 a 0,45	1,00	33,70	0,40	23,20
				Bloco 2		0,70 a 1,00	2,55	28,11	1,80	25,96
			P-03	Bloco 1	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,15 a 0,45	4,20	33,40	3,50	23,70
				Bloco 2	Areia argilosa (SC)	0,70 a 1,00	3,70	30,20	2,55	28,70
	Santos (2018)	Lagoa Encantada	P-04	-	Areia argilosa (SC)	0,00 a 1,30	26,79	35,94	9,08	33,83
			P-05	-	Areia siltosa (SM-SC)	0,00 a 0,96	11,30	34,77	2,67	33,83
	Atual estudo	UR-12	P-11	-	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,00 a 1,00	9,39	28,73	6,42	25,79

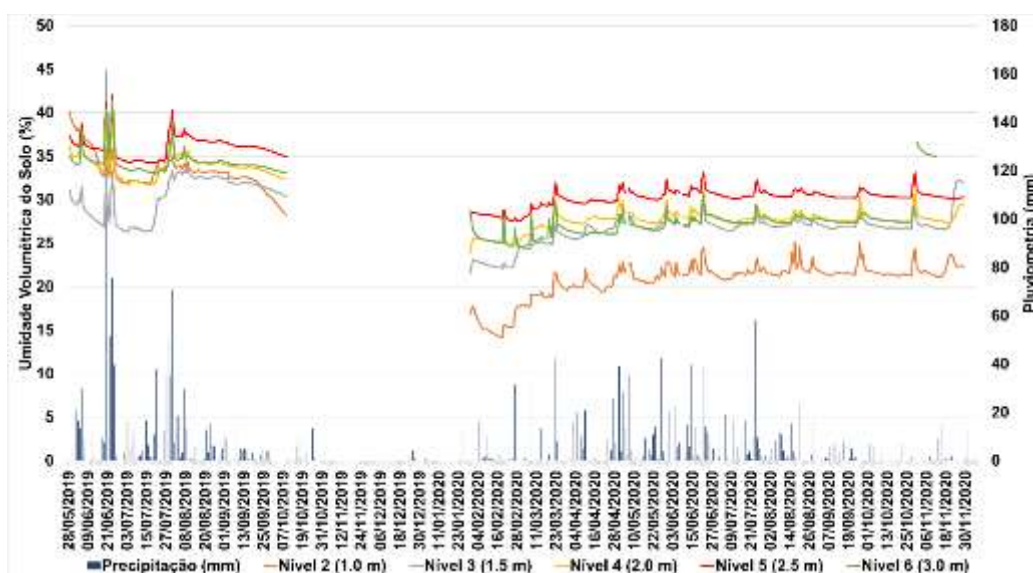
Fonte: O Autor (2022).

6.3 ANÁLISE DE DA VARIAÇÃO DE UMIDADE POR MEIO DAS PCDs GEOTÉCNICAS

Em concordância com o pormenorizado no item 5.1.4, foram instaladas PCDs Geotécnicas nos pontos P-06, P-07, P-08, P-09, P-10 e P-11, visando relacionar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva em tempo real. As PCDs Geotécnicas são compostas por sondas com 3 metros de comprimento que possuem sensores inseridos a cada meio metro, totalizando 6 sensores por sonda. Por estarem funcionando durante o período de tempo considerado nas modelagens realizadas e apresentarem uma maior série histórica de medições serão discutidos apenas os dados das sondas P-07, P-08 e P-11.

A Figura 87, apresenta o gráfico que associa a umidade média diária do solo com a chuva no ponto P-07, no período entre junho de 2019 e novembro de 2020. As análises desconsideraram os dados do primeiro sensor (localizando em 0,5 metro de profundidade), devido a falhas de leitura. Apesar do não funcionamento da PCD Geotécnica entre os meses de outubro e dezembro de 2019, a análise desse gráfico mostra que os sensores conseguem registrar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva, principalmente nos sensores mais superficiais (até 2,0m de profundidade). Nos sensores instalados em camadas mais profundas é observado uma variação menos acentuada da umidade ao longo do tempo.

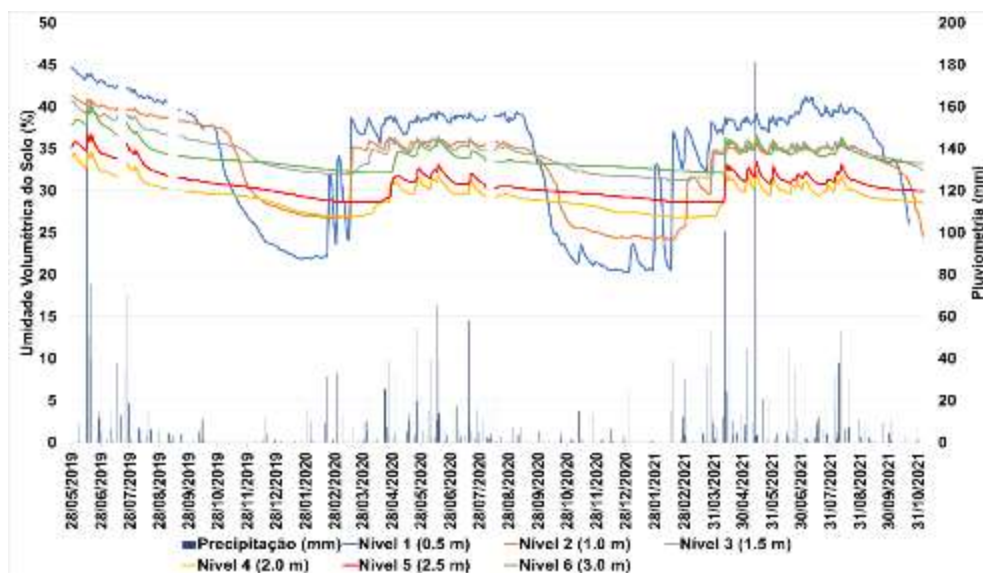
Figura 87 – Variação da umidade média diária do solo com a precipitação no ponto P-07 entre outubro e dezembro de 2019.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 88, apresenta o gráfico que correlaciona a umidade média diária do solo com a chuva no ponto P-08 no período entre junho de 2019 e outubro de 2021. Esse gráfico mostra de maneira mais clara o aumento da umidade do solo em períodos chuvosos e a redução da mesma em períodos mais secos, principalmente na umidade dos sensores mais superficiais (até 1,5m de profundidade).

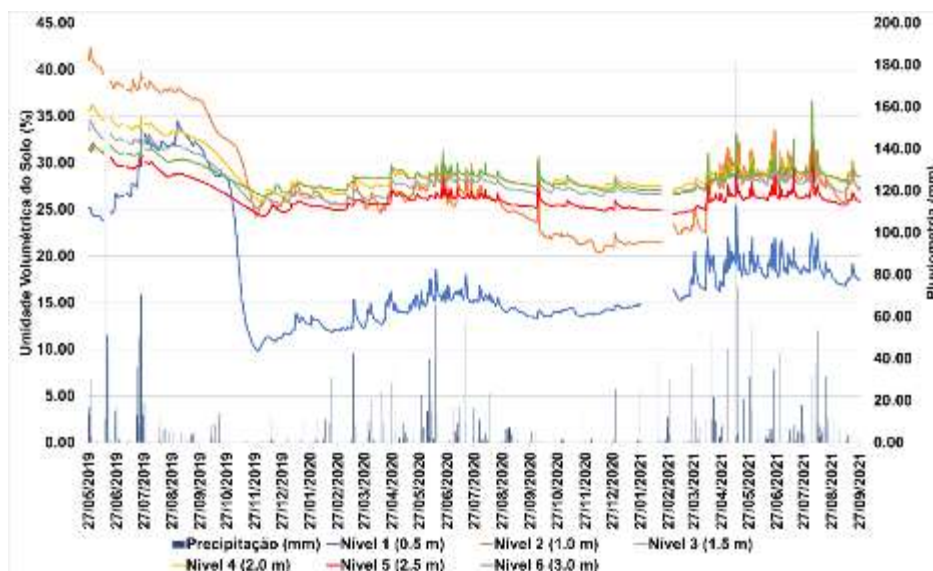
Figura 88 – Variação da umidade média diária do solo com a precipitação no ponto P-08 entre junho de 2019 e outubro de 2021.



Fonte: O Autor (2022).

No ponto P-11, o gráfico que relaciona a umidade média diária do solo com a chuva entre junho de 2019 e setembro de 2021, está exposto na Figura 89. O gráfico mostra um comportamento similar ao visto no gráfico do ponto P-08, porém é observado um aumento menos intenso da umidade no período chuvoso de 2020 e 2021 em comparação com o período chuvoso de 2019. Do mesmo modo que o visto nos pontos P-07 e P-08, as maiores variações de umidade são registradas nos sensores mais superficiais (até 2,0m de profundidade).

Figura 89 – Variação da umidade média diária do solo com a precipitação no ponto P-11 entre junho de 2019 e setembro de 2021.



Fonte: O Autor (2022).

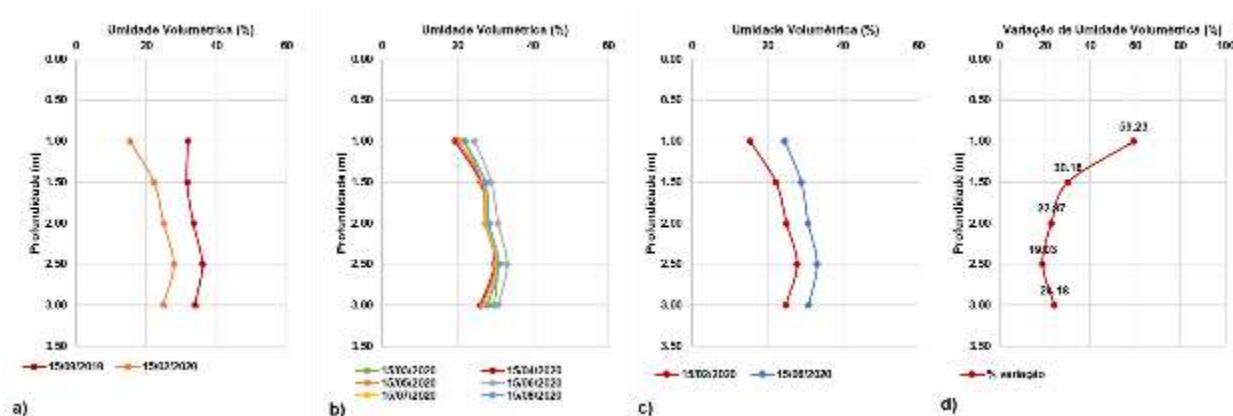
Comportamento semelhante ao apresentado na Figura 87, Figura 88 e Figura 89 foi verificado nos resultados apresentados por Mendes et al. (2017). Segundo esse autor os diferentes modos de variação da umidade entre as camadas do solo ao longo do perfil não refletem apenas as diferenças nas propriedades de retenção de cada camada, mas também a dinâmica da água através do solo. Isso explica porque as camadas mais superficiais apresentam um comportamento sensível (com vários picos) em resposta à chuva, enquanto as camadas mais profundas apresentam variações graduais e tardias relacionadas à percolação de águas em camadas mais profundas.

Através dos dados disponibilizados pelas PCDs Geotécnicas é possível traçar o perfil de umidade média diária dos pontos prospectados, considerando um intervalo de medição da umidade média diária do solo a cada 30 dias, visando possibilitar uma melhor visualização da variação da umidade ao longo do tempo. O cálculo do aumento relativo da umidade em %, inicia considerando o mês mais seco do período seco e em sequência o mês mais úmido do período úmido.

O perfil de umidade média diária do ponto P-07, disponibilizado na Figura 90, mostra uma maior variação de umidade do solo até a profundidade de 2,0 m. No período de tempo analisado o dia com perfil de umidade mais seco foi em 15/02/2020 e mais úmido no dia 15/06/2020. O ganho de umidade nos sensores localizados entre 1,0-2,0m de profundidade, decresce, variando entre 59,23% e 22,87%. Entre 2,0-

3,0m, a umidade decresce sutilmente, depois volta a crescer, nessa parcela, o ganho de umidade varia entre 24,18% e 19,03%. Esse comportamento pode ser influenciado pela granulometria, permeabilidade e a sucção deste solo.

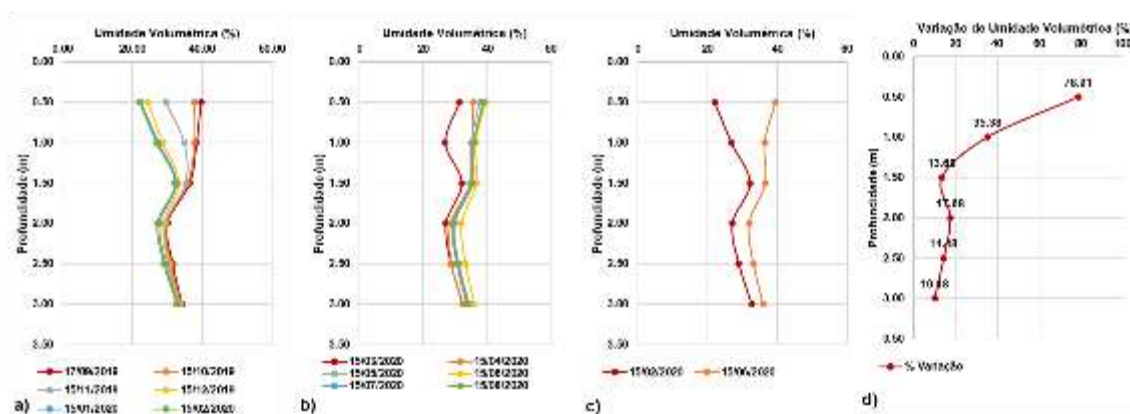
Figura 90 – Perfil da umidade média diária do solo no ponto P-07: a) período seco entre final de 2019 e início de 2020; b) período úmido de 2020; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas.



Fonte: O Autor (2022).

O perfil de umidade média diária do ponto P-08, disponibilizados na Figura 91 e Figura 92, mostra uma maior variação de umidade do solo até a profundidade de 1,5m. No período de tempo mostrado na Figura 91 o dia com perfil de umidade mais seco foi em 15/02/2020 e mais úmido no dia 15/06/2020. O ganho de umidade nos sensores localizados entre 0,5-1,5m de profundidade, decresce, variando entre 78,91% e 13,68%. Entre 1,5-3,0m, o ganho de umidade, aumenta e decresce sutilmente, variando entre 17,68% e 10,18%. Esse comportamento pode ser influenciado pela granulometria, permeabilidade e a sucção deste solo.

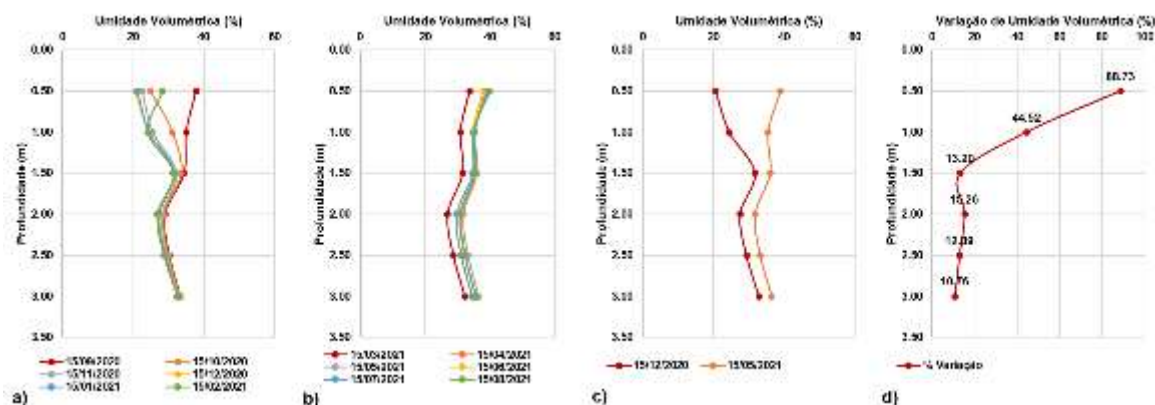
Figura 91 – Perfil da umidade média diária do solo no ponto P-08: a) período seco entre final de 2019 e início de 2020; b) período úmido de 2020; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas.



Fonte: O Autor (2022).

No período de tempo mostrado na Figura 92 o dia com perfil de umidade mais seco, para o ponto P-08, foi em 15/12/2020 e mais úmido no dia 15/05/2021. O ganho de umidade nos sensores localizados entre 0,5-1,5m de profundidade, também diminui e varia entre 88,73% e 13,20%. Entre 1,5-3,0m, o ganho de umidade aumenta e diminui de maneira sutil, apresentando variação entre 15,26% e 10,76%.

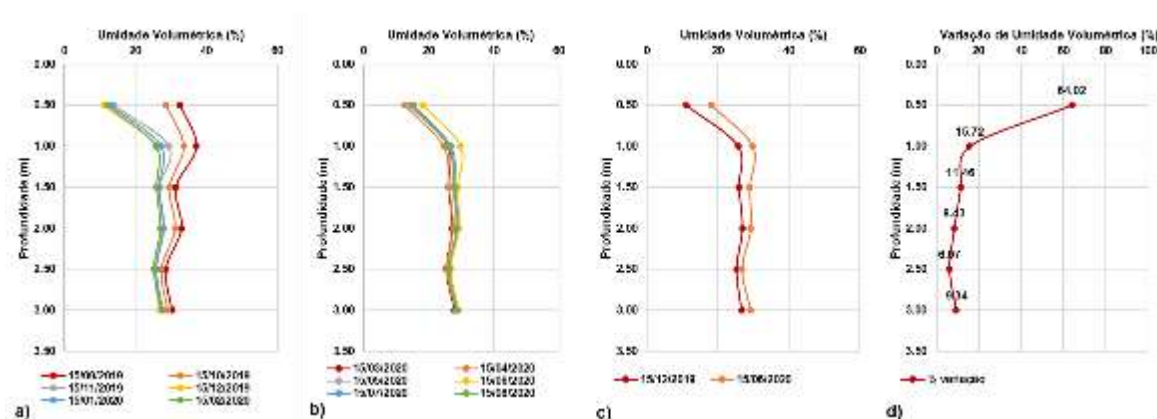
Figura 92 – Perfil da umidade média diária do solo no ponto P-08: a) período seco entre final de 2020 e início de 2021; b) período úmido de 2021; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Aumento relativo da umidade em % devido a ocorrência de chuvas.



Fonte: O Autor (2022).

O perfil de umidade média diária do ponto P-11, apresentada na Figura 93 e na Figura 94, mostra uma maior variação de umidade do solo até a profundidade de 2,0m. No período de tempo mostrado na Figura 93 o dia com perfil de umidade mais seco foi em 15/02/2021 e mais úmido no dia 15/06/2020. O ganho de umidade nos sensores localizados entre 0,5-2,0m de profundidade decresce, variando entre 64,02% e 8,43%. Entre 2,0-3,0m, o ganho de umidade decresce e aumenta sutilmente, variando entre 9,34% e 6,07%. Esse comportamento pode ser influenciado pela granulometria, permeabilidade e a sucção deste solo.

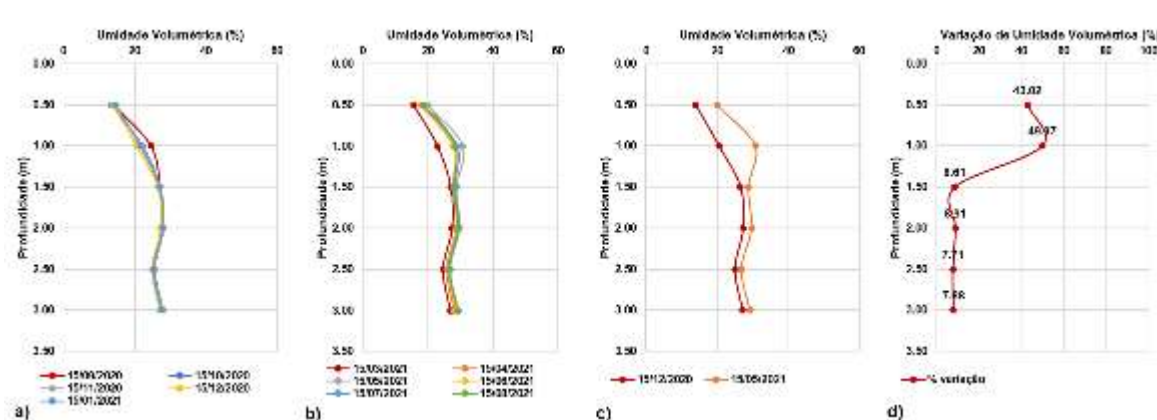
Figura 93 – Perfil de umidade do solo no ponto P-11: a) período úmido; b) período seco; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Perda em % da umidade do período mais úmido para o período mais seco.



Fonte: O Autor (2022).

No intervalo de tempo apresentado na Figura 94 o dia com perfil de umidade mais seco, para o ponto P-11, foi em 15/12/2020 e mais úmido no dia 15/05/2021. O ganho de umidade nos sensores localizados entre 0,5-1,5m de profundidade, varia entre 49,97% e 8,61%. Entre 1,5-3,0m, o ganho de umidade varia entre 8,91% e 7,71%, apresentando uma diferença menor que 2,00%.

Figura 94 – Perfil de umidade do solo no ponto P-11: a) período úmido; b) período seco; c) Comparação entre o mês mais úmido e o mês mais seco; d) Perda em % da umidade do período mais úmido para o período mais seco.



Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 48 apresenta a estimativa da sucção por meio das umidades volumétricas do solo aferidas pelas PCDs Geotécnicas do dia mais chuvoso do intervalo de tempo modelado no TRIGRS (11/06 - 20/06/19), especificadamente o dia 13/06/19, nos pontos P-7, P-8, P-9. Devido a falhas de leitura da PCD Geotécnica do ponto P-11 durante o período modelado, foi realizado a estimativa da sucção no dia 20/06/19. O método utilizado para estimar as sucções corresponde a relacionar a umidade volumétrica do solo medida pela PCD Geotécnicas com a sucção por meio

da curva característica. Os resultados indicam que no período modelado as camadas de solo prospectadas pelos sensores estavam majoritariamente saturadas, apresentando, portanto, sucção igual a zero.

Tabela 48 - Estimativa da sucção do solo por meio da unidade aferidas pelas PCDs Geotécnicas do dia mais chuvoso do intervalo de tempo modelado no TRIGRS.

Pontos de estudo	Data de coleta	Identificação do sensor	Curva característica utilizada	Prof. (m)	Θ (%)	Ψ (kPa)
P-07	13/06/19	Nível 1	CC-AMP-7,1	0,0 – 0,5	31.76	0
		Nível 2	CC-AMP-7,2	0,5 – 1,0	35.59	0
		Nível 3	CC-AMP-7,3	1,0 – 1,5	32.04	0
		Nível 4	CC-AMP-7,4	1,5 – 2,0	38.93	0
		Nível 5	CC-AMP-7,5	2,0 – 2,5	41.12	0
P-08	13/06/19	Nível 1	CC-AMP-8,1	0,0 – 0,5	43.99	0
		Nível 2	CC-AMP-8,2	0,5 – 1,0	40.74	0
		Nível 4	CC-AMP-8,4	1,5 – 2,0	33.27	2.9
		Nível 5	CC-AMP-8,5	2,0 – 2,5	38.16	0
P-09	13/06/19	Nível 1	CC-AMP-9,1	0,0 – 0,5	41.47	0
		Nível 2	CC-AMP-9,2	0,5 – 1,0	43.54	0
		Nível 3	CC-AMP-9,3	1,0 – 1,5	46.44	0
		Nível 4	CC-AMP-9,4	1,5 – 2,0	40.05	0
		Nível 5	CC-AMP-9,5	2,0 – 2,5	44.85	0
		Nível 6	CC-AMP-9,6	2,5 – 3,0	44.69	0
P-11	20/06/19	Nível 1	CC-AMP-11,1	0,0 – 0,5	24.58	6.5
		Nível 2	CC-AMP-11,2	0,5 – 1,0	38.77	0
		Nível 3	CC-AMP-11,3	1,0 – 1,5	33.18	0
		Nível 4	CC-AMP-11,4	1,5 – 2,0	34.85	0
		Nível 5	CC-AMP-11,5	2,0 – 2,5	30.62	0

Fonte: O Autor (2022).

6.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Esse capítulo visou apresentar os resultados dos ensaios realizados em campo, laboratório e das PCDs Geotécnicas instaladas na área de estudo. Os ensaios de campo consistiram em coleta de amostras deformadas por meio do trado manual, sondagem a percussão SPT e determinação da condutividade hidráulica por meio do Permeâmetro de Guelph. Os ensaios de laboratório consistiram em ensaios de

granulometria, limites de Atterberg, ensaio edométrico, cisalhamento direto e determinação da curva característica.

De maneira sucinta, as amostras coletadas foram submetidas a análises táteis-visuais que classificaram o substrato investigado como pertencente à Formação Barreiras, constituído por sedimentos areno-siltico-argilosos de canal fluvial. O perfil determinado por meio da sondagem do tipo SPT se apresentou predominantemente arenoso com aumento do N_{SPT} com a profundidade. Os coeficientes de permeabilidade saturada (K_{sat}) apresentaram ordem de grandeza de 10^{-7} m/s se encontrando dentro da faixa de valores esperados para os solos da Formação Barreiras.

Os ensaios de granulometria e limites de Atterberg, mostraram que esse os solos analisados são classificados como areias argilosas (SC) ou areias argilosas e siltosas (SM-SC) de acordo com a SUCS. O resultado do ensaio edométrico classificou o solo como condicionado ao colapso. Os parâmetros de resistência determinados por meio do ensaio de cisalhamento direto, apresentou concordância com a faixa de valores apresentados na literatura. As curvas características determinadas apresentam comportamento típico de solos arenosos e formato bimodal.

Os gráficos gerados por meio dos dados coletados pelas PCDs Geotécnicas instaladas na área de estudo, mostraram que os sensores conseguiram registrar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva. Os resultados mostram que a umidade das camadas superficiais mostrou uma maior variação em relação a umidade das camadas mais profundas.

7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS

Esse capítulo tem como finalidade apresentar os resultados das análises de suscetibilidade geradas pelo modelo TRIGRS. O modelo TRIGRS permite avaliar a previsibilidade espaço-temporal de eventos de deslizamento de modo regional (PARK; NIKHIL; LEE, 2013). Os principais resultados desse modelo é o cálculo da poropressão transiente e do fator de segurança em diferentes etapas de tempo do evento pluviométrico considerado (VIET et al. 2017).

7.1 INTEGRAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E HIDROLÓGICOS UTILIZADOS

As análises de suscetibilidade realizadas por meio do TRIGRS consideraram os parâmetros geotécnicos determinados por meio da investigação geológica-geotécnica realizada em campo e laboratório, como também parâmetros geotécnicos coletados em estudos anteriores realizados pelo GEGEP/UFPE dentro da área de interesse. A Tabela 49 apresenta as referências, a classificação SUCS e os parâmetros geotécnicos e hidrológicos que serão utilizados nas análises de suscetibilidade.

Tabela 49 – Tabela de integração dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados.

Ref.	Ponto	Classificação SUCS	Prof. (m)	γ_{sat}	Parâmetros		Permeabilidade
					c'	ϕ'	K_{sat}
Santana (2006)	P-01	Areia argilosa (SC)	0,00 - 3,30	18,92	0,00	36,10	2,12E-05
Meira (2008)	P-02	Areia argilosa (SC)	0,15 - 0,45	18,93	0,40	23,20	1,08E-05
			0,70 - 1,00	18,69	1,80	25,96	1,18E-05
	P-03	Areia argilosa (SC)	0,15 - 0,45	18,83	3,50	23,70	1,05E-05
Santos (2018)	P-05	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,00 - 0,96	18,94	2,67	33,83	6,36E-06
Atual estudo	P-11	Areia argilosa siltosa (SM-SC)	0,70 - 1,00	18,45	6,42	25,79	5,22E-07
Média				18,76	2,48	28,18	1,20E-05

LEGENDA:

γ_{sat} - peso específico saturado (kN/m³);

c' – coesão efetiva (kPa);

ϕ' - ângulo de atrito efetivo (°);

K_{sat} - coeficiente de permeabilidade saturada (m/s);

Fonte: O Autor (2022).

No cálculo da média, apresentada na Tabela 49, foram desprezados os resultados do ponto P-04, pois estes apresentaram valores demasiadamente distintos dos demais. O ajuste das curvas características utilizadas, realizados por meio do modelo Gardner (1958), para obtenção dos parâmetros necessários para realização das análises não saturadas estão dispostos nos itens 7.1.1.1 e 7.1.1.2. Ademais, as curvas características determinadas em estudos realizados pelo GEGEP/UFPE, que foram empregadas nas análises de suscetibilidade desse estudo, estão dispostas no Anexo B.

As análises realizadas utilizando mais de uma zona de propriedades, considera a média dos parâmetros obtidos por Meira (2008), conforme o exposto na Tabela 50, pois os mesmos não apresentam diferenças significativas em entre si e possuem a mesma classificação SUCS e granulometria semelhante, conforme o apresentado na Tabela 38.

Tabela 50 – Média dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos definidos por Meira (2008).

Ref.	Ponto	Classificação SUCS	Prof. (m)	γ_s	Parâmetros		Permeabilidade
					c'	φ'	K _{sat}
Meira (2008)	P-02	Areia argilosa (SC)	0,15 - 0,45	18,93	0,40	23,20	1,08E-05
			0,70 - 1,00	18,69	1,80	25,96	1,18E-05
	P-03	Areia argilosa (SC)	0,15 - 0,45	18,83	3,50	23,70	1,05E-05
			0,70 - 1,00	18,59	2,55	28,70	2,30E-05
	Média			18,76	2,06	25,39	1,40E-05

LEGENDA:

γ_{sat} - peso específico saturado (kN/m³);

c' – coesão efetiva (kPa);

ϕ' - ângulo de atrito efetivo (°);

K_{sat} - coeficiente de permeabilidade saturada (m/s);

Fonte: O Autor (2022).

O I_{ZLT} é definido como taxa de infiltração inicial é considerado único para todas as análises realizadas. Esse parâmetro foi estimado utilizando a precipitação acumulada dos 30 dias anteriores ao evento modelado seguindo a sugestão de Marin, Velasquez e Sánchez (2021). O cálculo utilizado para estimar I_{ZLT} , está exposto na Equação (28).

$$I_{ZLT} = \frac{158,11 \text{ mm}}{30 \text{ dias}} = \frac{0,15842 \text{ m}}{2592000 \text{ s}} = 6,11 \times 10^{-8} \text{ m/s} \quad (28)$$

7.1.1 Definição dos cenários das análises de suscetibilidade

Para as análises de suscetibilidade por meio do TRIGRS foram elaborados dois Cenários, denominados A e B. Em ambos os cenários foram realizadas análises considerando o modelo de infiltração saturada (análises do tipo SAT) e não saturada (análises do tipo NSAT). O Z_{max} foi assumido como uniforme para todos os cenários analisados, sendo equivalente a 1,0m, 2,0m e 3,0m de profundidade. Além disso, foi considerado que o nível de água inicial se encontra na mesma profundidade do Z_{max} considerado.

7.1.1.1 Dados de entrada do Cenário A

O Cenário A realiza as análises de suscetibilidade considerando a área de estudo completa e os parâmetros geotécnicos e hidrológicos constantes em toda área. Os parâmetros utilizados foram definidos por meio da média de parâmetros geotécnicos e hidrológicos obtidos em estudos realizados dentro da área de interesse. Os parâmetros utilizados para o cálculo da média estão disponibilizados na Tabela 49. Os parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados no Cenário A estão dispostos na Tabela 51.

Tabela 51 – Parâmetros geotécnicos utilizados no cenário A.

Zona	γ_{sat}	c'	ϕ'	K_{sat}	D_0	Θ_s	Θ_r	α
1	18,76	2,48	28,18	1,20E-5	1,20E-3	0,41	0,19	1,96

LEGENDA:

γ_{sat} - peso específico saturado (kN/m³);

c' – coesão efetiva (kPa);

ϕ' - ângulo de atrito efetivo (°);

K_{sat} - coeficiente de permeabilidade saturada (m/s);

D_0 - difusidade hidráulica - $K_{sat} \times 100$ (m²/s);

Θ_s - teor volumétrico de água saturado (%);

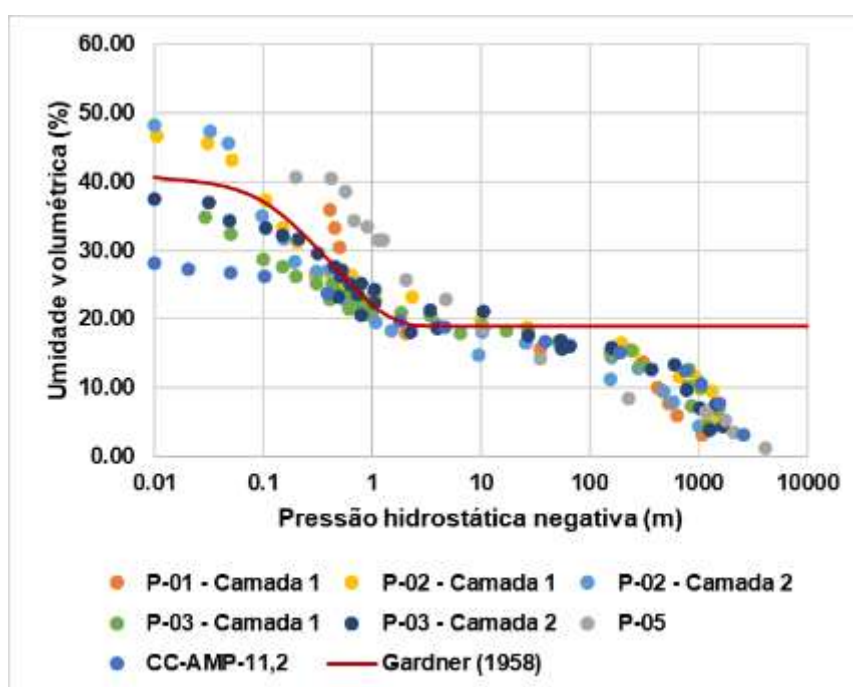
Θ_r - teor volumétrico de água residual (%);

α - parâmetro de ajuste de Gardner (m^{-1});

Fonte: O Autor (2022).

A curva característica utilizada para as análises do Cenário A foi ajustada por meio do modelo de Gardner (1958), considerando a junção das curvas características determinadas na área de estudo. A Figura 95 apresenta as curvas características consideradas e o respectivo ajuste obtido através do modelo proposto por Gardner (1958).

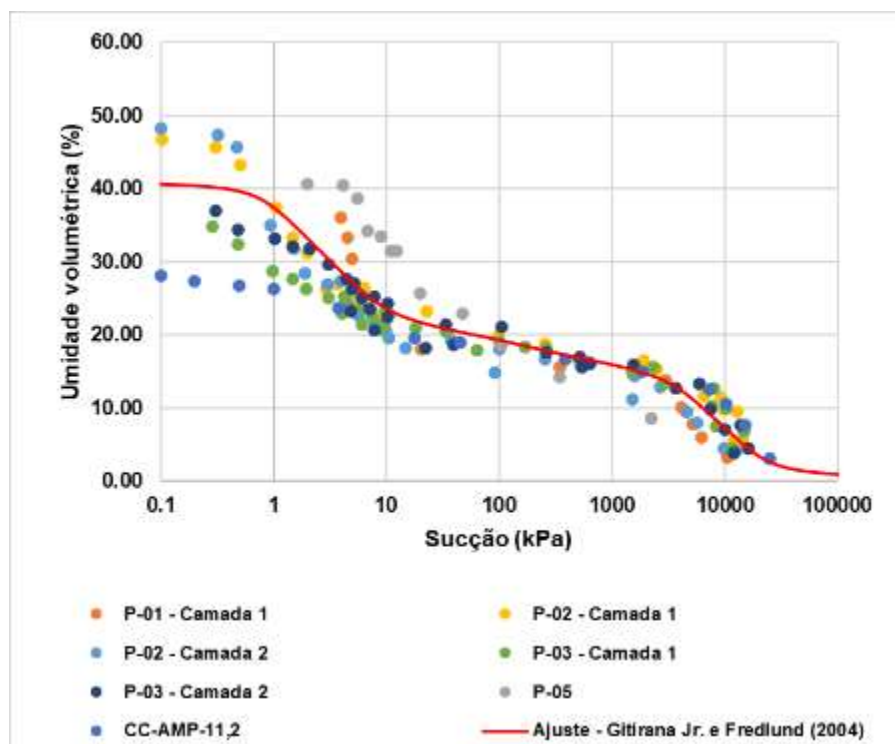
Figura 95 – Curva característica utilizada no Cenário A ajustada através do modelo de Gardner (1958).



Fonte: O Autor (2022).

A metodologia de ajuste das curvas características consideradas no Cenário A por meio do modelo de Gardner (1958), também foi aplicada através do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004), devido a capacidade desse modelo de ajustar curvas características com formato bimodal. A Figura 96 apresenta as curvas características consideradas e o respectivo ajuste obtido por meio do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004).

Figura 96 – Curva característica utilizada no Cenário A ajustada através do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004).



Fonte: O Autor (2022).

Os parâmetros de ajuste do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) para as curvas características consideradas no Cenário A estão disponibilizadas na Tabela 52. Devido a capacidade de ajustar curvas características de formato bimodal, o modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) consegue obter uma umidade residual menor que advém do segundo trecho da curva característica, referente a dessaturação da microestrutura, não considerada no modelo de Gardner (1958). Essa limitação do modelo de Gardner (1958) reduz a estimativa da resistência ao cisalhamento não saturada no modelo TRIGRS.

Tabela 52 - Parâmetros de ajustes do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) da curva característica utilizada no Cenário A.

θ_{sat}	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	θ_{res1}	ψ_{b2}	S_b	θ_b	ψ_{res2}	S_{res2}	θ_{res2}
41,01	0,86	8,20	0,52	21,48	4227,97	0,37	15,15	20325,69	0,01	0,56

LEGENDA:

- θ_{sat} umidade volumétrica saturada;
- ψ_{b1} sucção do 1º ponto de entrada de ar;
- ψ_{res1} sucção residual do 1º trecho;
- S_{res1} grau de saturação residual do 1º trecho;

ψ_{b2}	sucção do 2º ponto de entrada de ar;
S_b	grau de saturação do 2º ponto de entrada de ar;
θ_b	umidade volumétrica do 2º ponto de entrada de ar;
ψ_{res2}	sucção residual do 2º trecho;
θ_{res2}	umidade volumétrica residual do 2º trecho;
a	parâmetro de ajuste da curva.

Fonte: O Autor (2022).

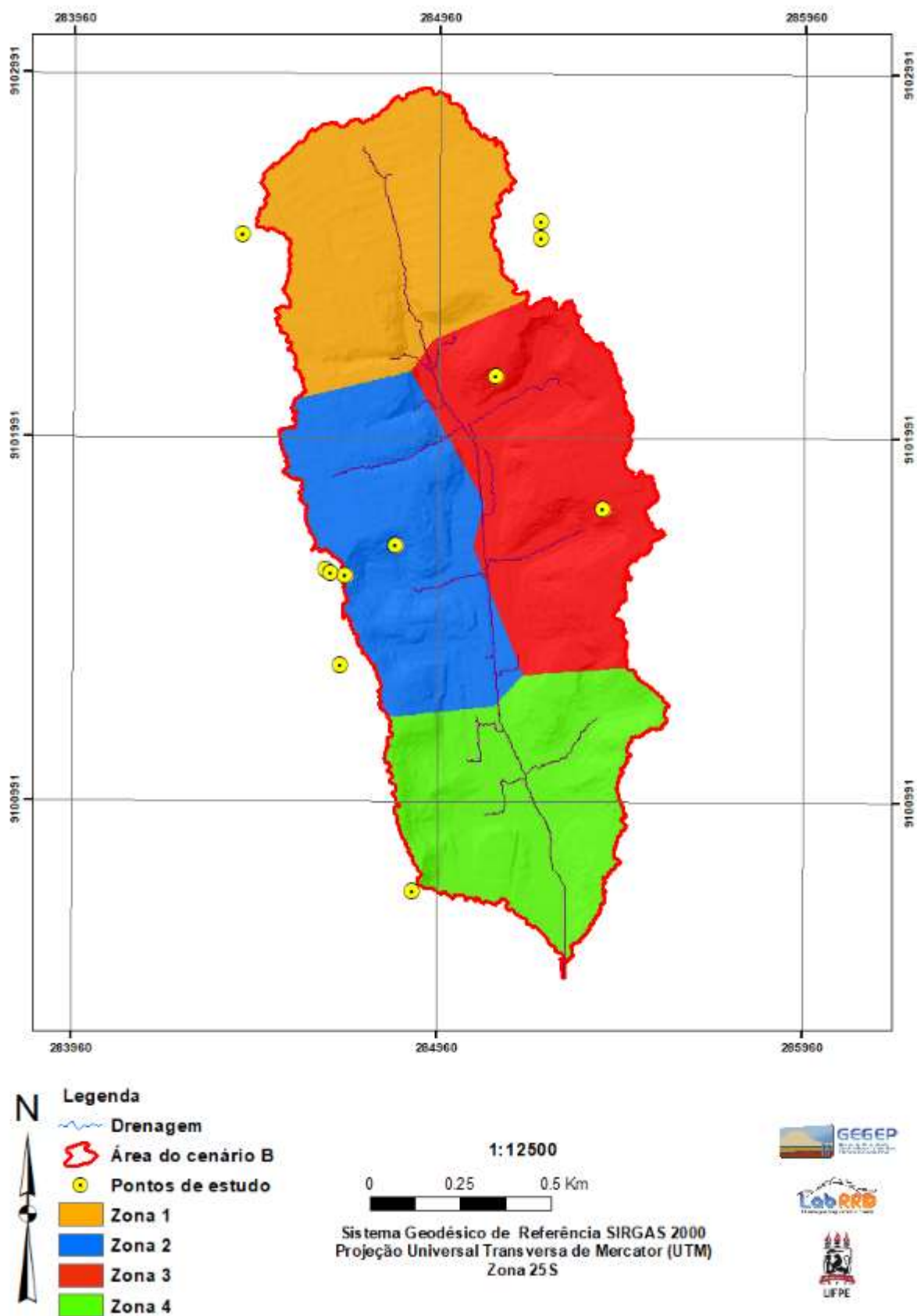
7.1.1.2 Dados de entrada do Cenário B

O cenário B considera que os parâmetros geotécnicos estão especializados em quatro zonas de propriedades geotécnicas. As zonas foram definidas considerando que os parâmetros determinados em cada ponto de estudo possuem uma área de influência. O mapa da Figura 97 apresenta a localização dessas zonas dentro da área da bacia menor.

Para criação das zonas de propriedades, utilizou-se a ferramenta “Create Thiessen Polygons” disponível no ArcMap 10.1. Esta ferramenta é usada para dividir em zonas menores uma área que possui recursos representados por meio de pontos (ARCGIS..., 2019).

Os dados utilizados em cada uma das zonas estão apresentados na Tabela 53. Esses mesmos dados estão disponibilizados com maiores detalhes na Tabela 49. Os parâmetros da Zona 2 foram determinados por meio da média dos parâmetros definidos por Meira (2008), conforme o apresentado na Tabela 50. Nas demais zonas os parâmetros foram adotados integralmente da forma disponibilizada pelos autores.

Figura 97 – Zonas geotécnicas.



Fonte: O Autor (2022).

Tabela 53 - parâmetros geotécnicos utilizados no cenário B.

Zona	Autor	γ_s	c'	φ'	K_{sat}	D_0	Θ_s	Θ_r	α
1	Santana (2006)	19,75	0,00	32,55	2,12E-5	2,12E-3	0,52	0,16	1,61
2	Meira (2008)	18,76	2,06	25,39	1,40E-5	1,40E-3	0,45	0,19	3,54
3	Santos (2018)	18,94	2,67	33,83	6,36E-6	6,36E-4	0,43	0,16	0,45
4	Atual estudo	18,45	6,42	25,79	5,22E-7	5,22E-5	0,27	0,17	0,68

LEGENDA:

γ_{sat} - peso específico saturado (kN/m³);

c' – coesão efetiva (kPa);

φ' - ângulo de atrito efetivo (°);

K_{sat} - coeficiente de permeabilidade saturada (m/s);

D_0 - difusidade hidráulica - $K_{sat} \times 100$ (m²/s);

Θ_s - teor volumétrico de água saturado (%);

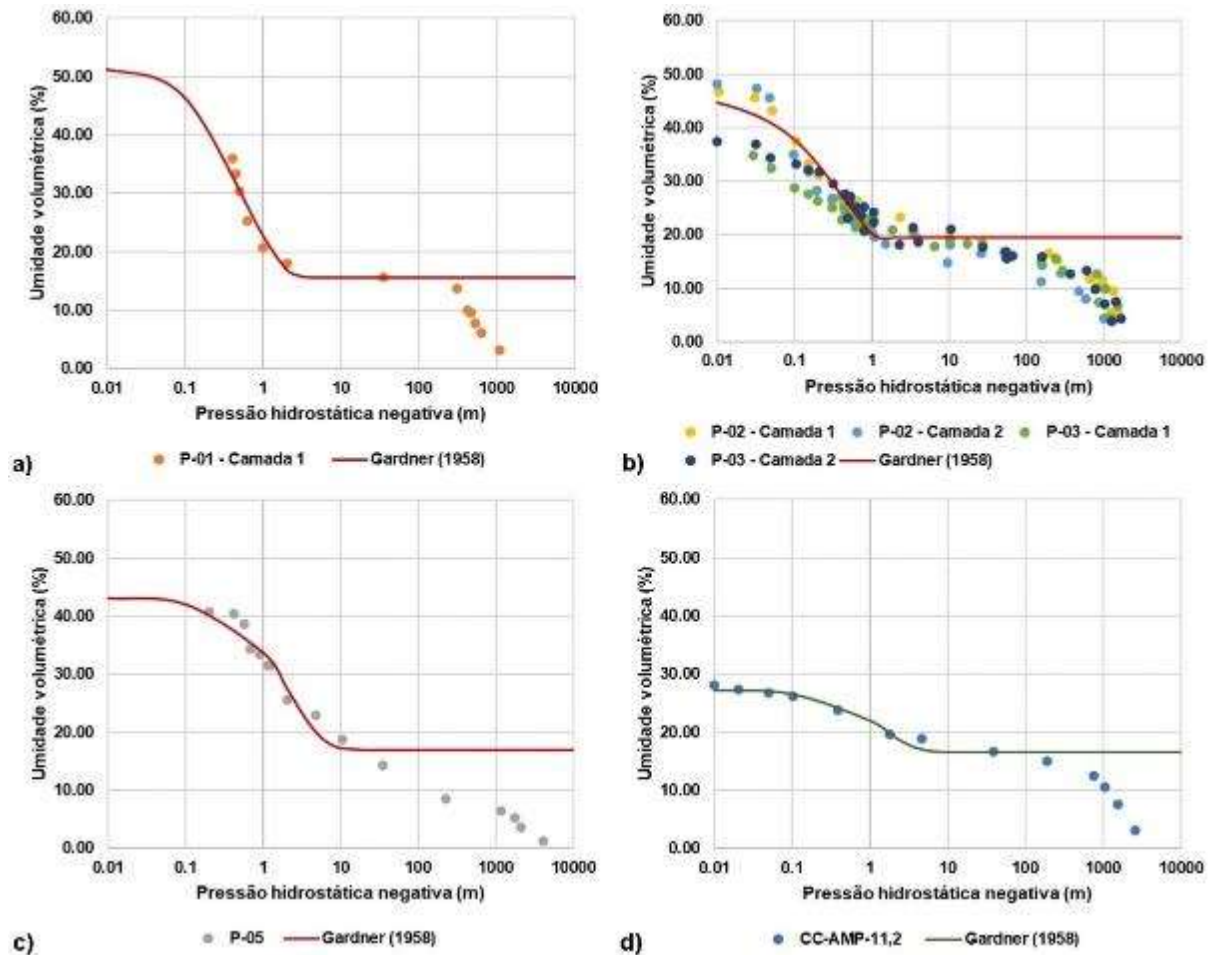
Θ_r - teor volumétrico de água residual (%);

α - parâmetro de ajuste de Gardner (m⁻¹);

Fonte: O Autor (2022).

A curva característica da Zona 2 foi ajustada por meio da junção das curvas determinadas por Meira (2008). As demais curvas características foram adotadas da forma disponibilizada pelos autores. As curvas características adotadas e o ajuste por meio do modelo de Gardner (1958) para as Zonas 1, 2, 3 e 4 estão apresentadas na Figura 98.

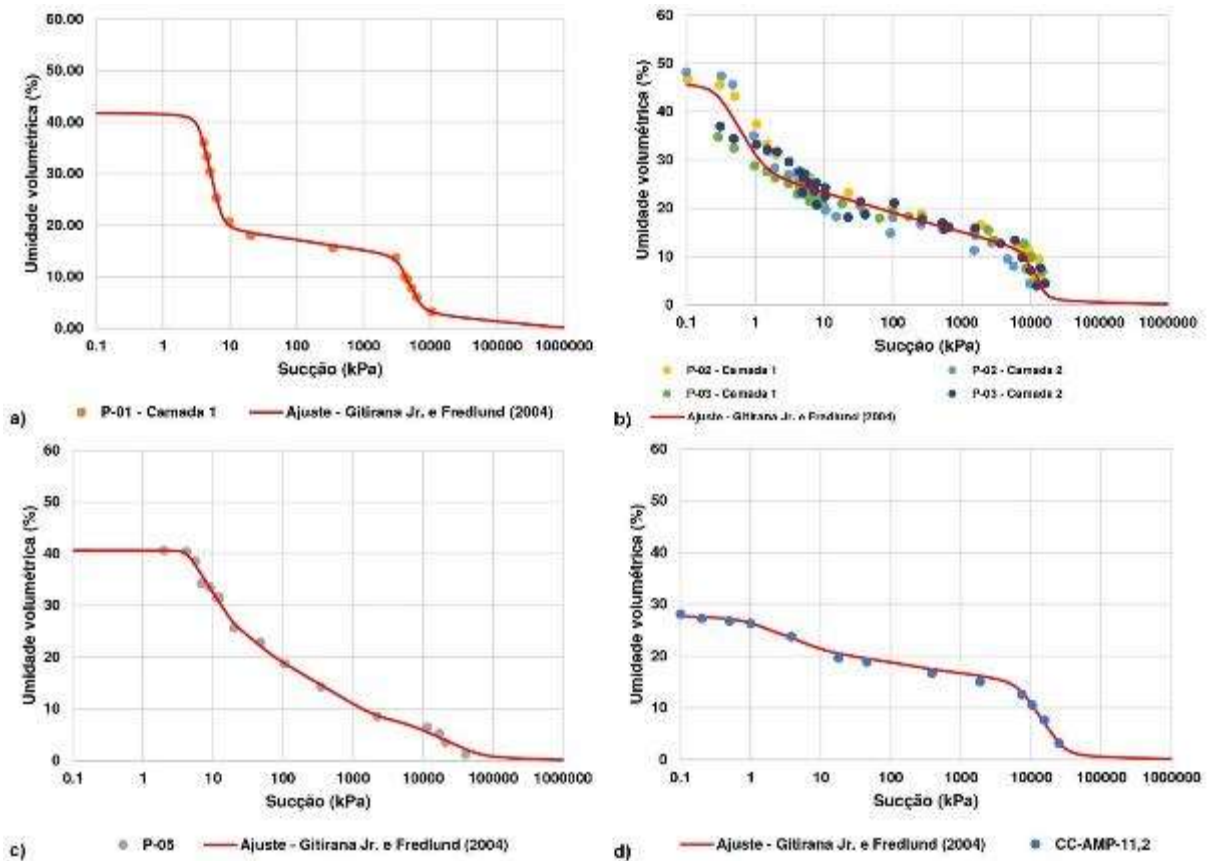
Figura 98 - Curvas características utilizadas na modelagem ajustadas através do modelo de Gardner (1958): a) Zona 1; b) Zona 2; c) Zona 3 e d) Zona 4.



Fonte: O Autor (2022).

A metodologia de ajuste das curvas características consideradas no Cenário B por meio do modelo de Gardner (1958), também foi aplicada através do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004). A Figura 96 apresenta as curvas características consideradas em cada zona e o respectivo ajuste obtido por meio do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004).

Figura 99 - Curva característica utilizada na modelagem ajustadas através do modelo de Gardner (1958): a) Zona 1; b) Zona 2; c) Zona 3 e d) Zona 4.



Fonte: O Autor (2022).

Os parâmetros de ajuste do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) das curvas características utilizadas em cada uma das zonas consideradas no Cenário B estão disponibilizadas na Tabela 54. Devido a capacidade de ajustar as curvas características de formato bimodal, o modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) consegue obter umidades residuais menores que advém do segundo trecho da curva característica. Essa limitação do modelo de Gardner (1958) reduz a estimativa da resistência ao cisalhamento não saturada no modelo TRIGRS.

Tabela 54 - Parâmetros de ajuste do modelo de Gitirana Junior e Fredlund (2004) das curvas características utilizadas no Cenário B.

Zona	θ_{sat}	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	θ_{res1}	ψ_{b2}	S_b	θ_b	ψ_{res2}	S_{res2}	θ_{res2}
1	41,87	3,44	7,43	0,45	18,81	3837,92	0,35	14,59	6208,62	0,06	2,55
2	46,33	0,29	1,24	0,56	26,17	9776,22	0,25	11,49	13965,76	0,01	0,49
3	40,68	4,21	19,65	0,64	25,95	151,02	0,45	18,28	65304,59	0,01	0,41
4	28,09	1,22	6,21	0,72	20,24	6659,37	0,56	15,72	28557,19	0,01	0,28

LEGENDA:

θ_{sat}	umidade volumétrica saturada;
ψ_{b1}	sucção do 1º ponto de entrada de ar;
ψ_{res1}	sucção residual do 1º trecho;
S_{res1}	grau de saturação residual do 1º trecho;
ψ_{b2}	sucção do 2º ponto de entrada de ar;
S_b	grau de saturação do 2º ponto de entrada de ar;
θ_b	umidade volumétrica do 2º ponto de entrada de ar;
ψ_{res2}	sucção residual do 2º trecho;
θ_{res2}	umidade volumétrica residual do 2º trecho;
a	parâmetro de ajuste da curva.

Fonte: O Autor (2022).

7.2 RESULTADOS DO CENÁRIO A

Nesse item serão apresentados e comparados os resultados do Cenário A.

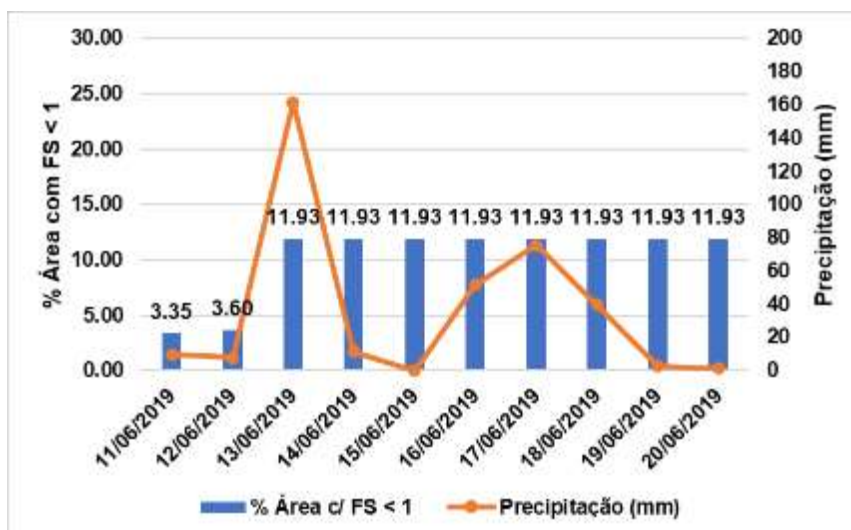
7.2.1.1 Análises SAT do Cenário A

As análises do tipo SAT foram realizadas utilizando o modelo de infiltração inicial saturada para três valores de Z_{max} .

7.2.1.1.1 Análise ASAT1

Nessa análise o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 1,00 metro de profundidade a partir da superfície. A Figura 100 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável aumenta, atingindo 11,93%, quando a precipitação correspondeu a 161,53mm no dia 13/06/19. A partir dessa data a % de área instável se mantém constante até o último dia analisado (20/06/19).

Figura 100 – Análise ASAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 101 plota a distribuição espacial da área instável para todos os dias analisados. A sequência de mapas mostra que a área classificada com $FS \leq 1,00$, aumentou consideravelmente no dia 13/06, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico, no qual será realizado a validação. Nos dias seguintes as áreas classificadas com $FS \leq 1,00$ não apresenta variação. Destaca-se que nesse cenário o $FS_{\min}$ foi calculado na profundidade de 1,00 metro a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao $Z_{\max}$.

A Figura 102 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao $FS_{\min}$. A sequência de mapas mostra uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm. Nesse dia, em algumas localidades, a pressão hidrostática é igual 0,9418 m.

A distribuição de poropressão alcançada no dia 13/06/19 se mantém constante até 20/06/19 (último dia analisado), exceto em 15/06/19 que apresenta uma redução sutil dos valores obtidos. Esses resultados indicam que a chuva precipitada após o dia 13/06/19 conseguiu manter a mesma distribuição de poropressão. Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias explica porque a % porcentagem de área instável aumenta e se mantém constante entre 13/06/19 e 20/06/2019. Segundo Baum, Godt e Savage (2010), o aumento da poropressão causada pela infiltração da água da chuva explica porque a área com $FS \leq 1,00$ varia com a precipitação.

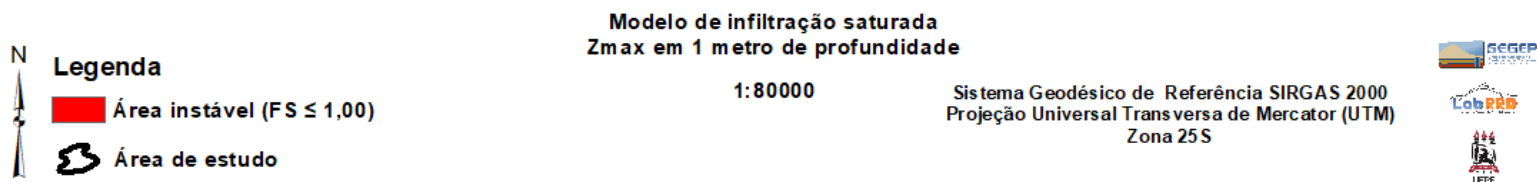
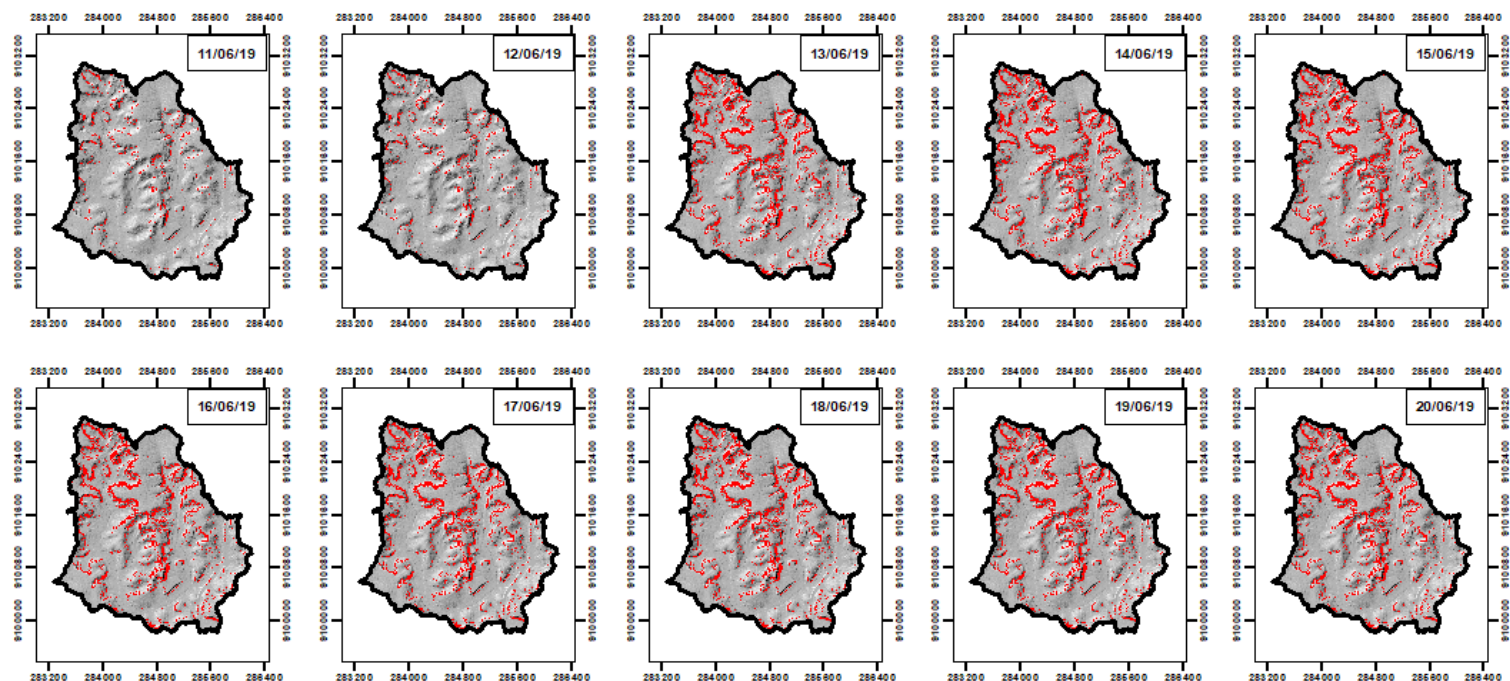
A Figura 103 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise ASAT1. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. A Tabela 55 apresenta a validação desse mapa por meio do método LR_{class} . Através dela constata-se que 11,93% da área prevista pelo modelo foi classificada como instável abrangendo 72,80% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 80,52%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 80,52% de chance de incluí-lo.

Tabela 55 – Análise ASAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% Área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
FS $\leq$ 1,00	273	72,80	11,93	6,10	80,52
1,00 < FS $\leq$ 1,25	16	4,27	7,07	0,60	7,96
1,25 < FS $\leq$ 1,50	14	3,73	6,05	0,62	8,14
FS > 1,50	72	19,20	74,95	0,26	3,38
	375,00 (b)	100,00	100,00	8,10 (f)	100,00

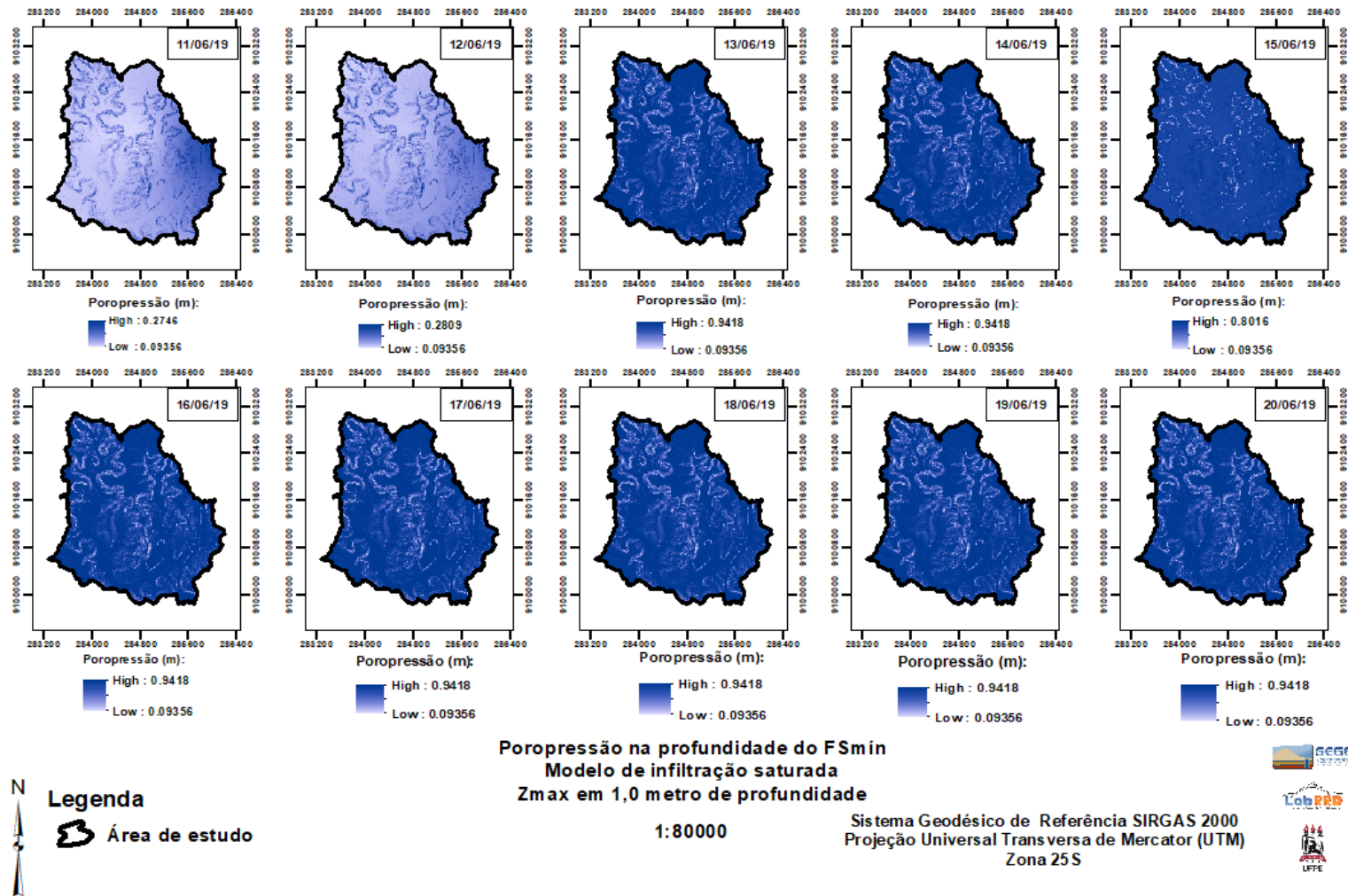
Fonte: O Autor (2022).

Figura 101 - Análise ASAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



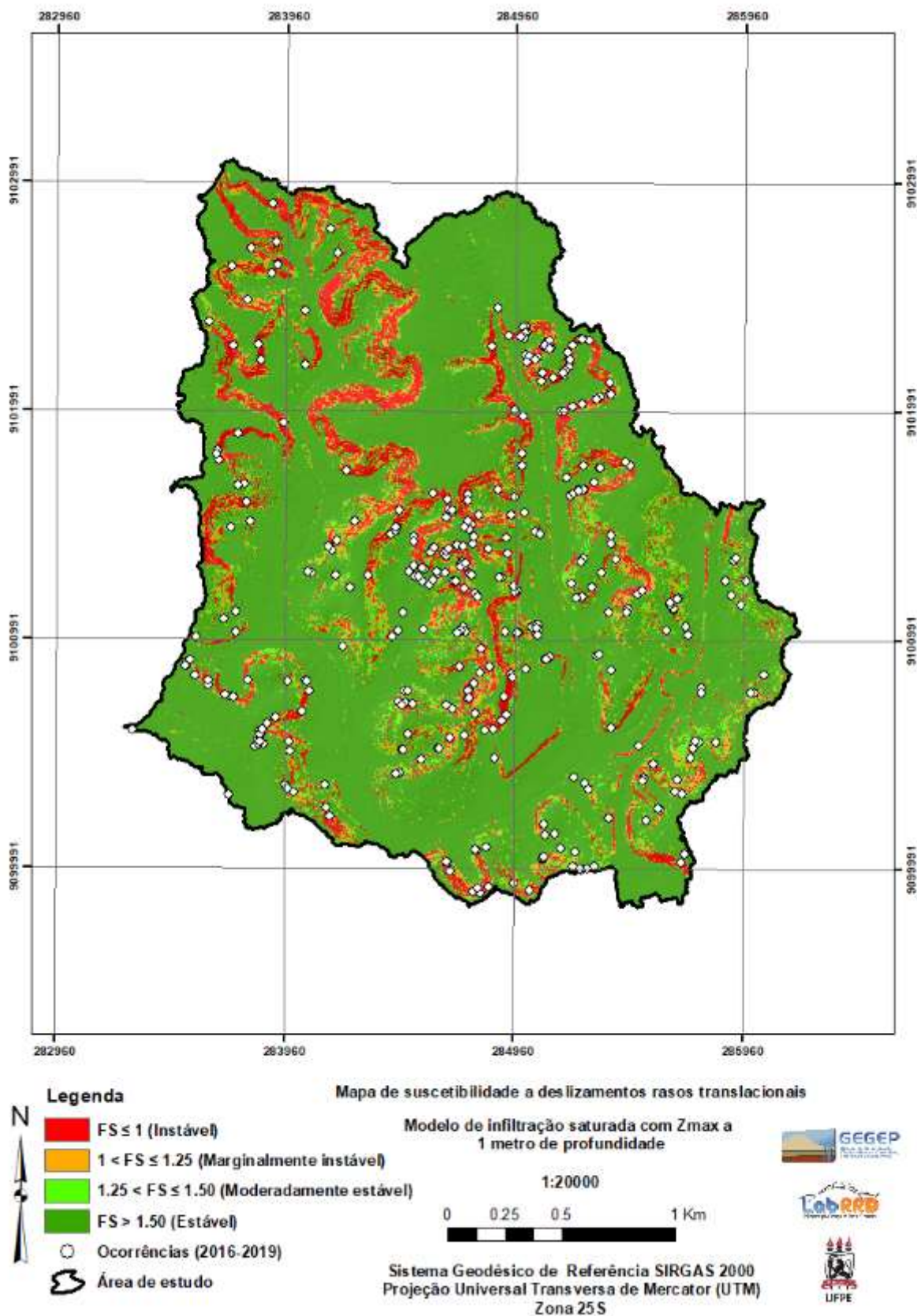
Fonte: O Autor (2022).

Figura 102 - Análise ASAT1: Variação da poropressão com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 103 – Análise ASAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

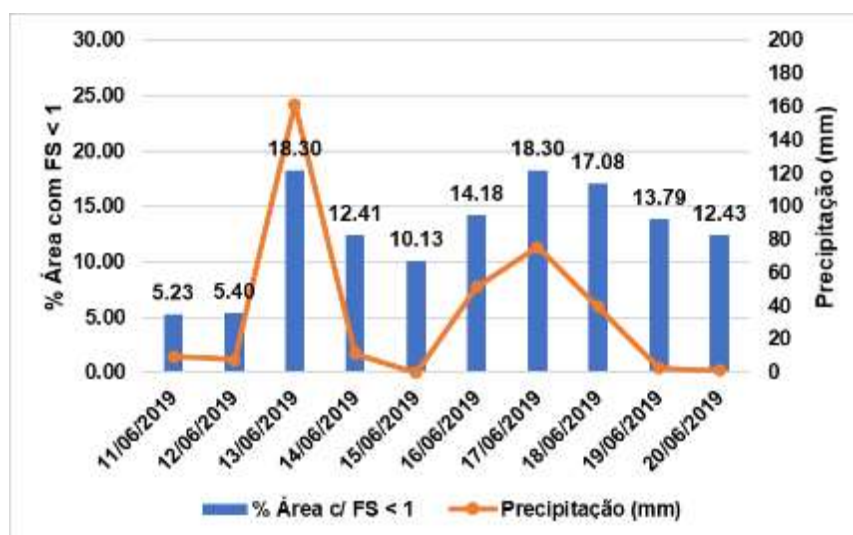


Fonte: O Autor (2022).

7.2.1.1.2 Análise ASAT2

Nessa análise o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,00 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 104 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável foi sensível a precipitação variando de acordo com a intensidade da mesma, alcançando um resultado igual a 18,30%, quando a precipitação correspondeu a 161,53mm no dia 13/06/19.

Figura 104 – Análise ASAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 105 plota a distribuição espacial da área instável para todos os dias analisados. Os mapas dispostos em ordem cronológica mostram que a área classificada com $FS \leq 1,00$, aumenta consideravelmente no dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico, no qual será realizada a validação. Nos dias subsequentes a área instável varia de acordo com a intensidade da chuva. Nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 2 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 106 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . Os mapas mostram que ocorre uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão no 13/06, devido a precipitação de 161,53mm. Nesse dia, em algumas localidades, a pressão hidrostática é igual 1,764 m.

A distribuição de poropressão varia ao longo dos dias de acordo com a intensidade da chuva. A comparação entre as análises ASAT1 e ASAT2, mostra que devido ao maior Z_{max} as precipitações ocorridas no intervalo considerado não conseguiram manter o mesmo nível de poropressão alcançado no dia 13/06/19, apresentando variações acentuadas nos dias subsequentes. Essa variação da poropressão, explica porque a análise ASAT2 apresenta uma variação da % de área instável mais expressiva que a análise ASAT1.

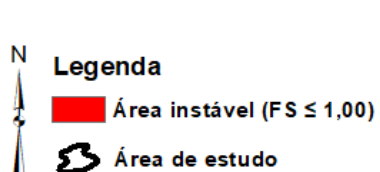
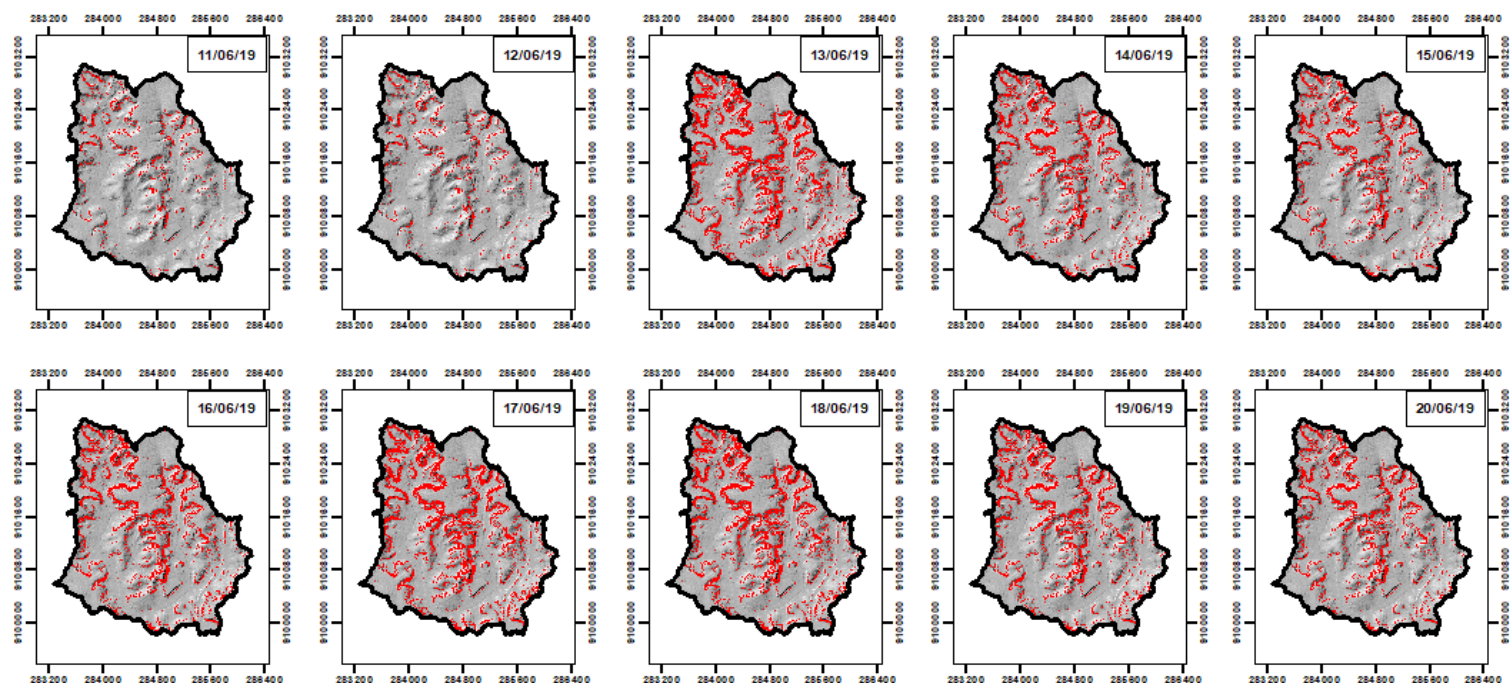
A Figura 107 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise ASAT2. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. A Tabela 56 apresenta a validação desse mapa por meio do método LR_{class} . Através dela constata-se que 18,30% da área prevista pelo modelo foi classificada como instável, abrangendo 76,27% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 73,10%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 73,10% de chance de incluí-lo.

Tabela 56 – Análise ASAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
FS $\leq$ 1,00	286	76,27	18,30	4,17	73,10
1,00 < FS $\leq$ 1,25	19	5,07	7,18	0,71	12,39
1,25 < FS $\leq$ 1,50	12	3,20	5,30	0,60	10,59
FS > 1,50	58	15,47	69,22	0,22	3,92
	375 (b)	100,00	100,00	5,70 (f)	100,00

Fonte: O Autor (2022).

Figura 105 – Análise ASAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Modelo de infiltração saturada
Zmax em 2 metros de profundidade

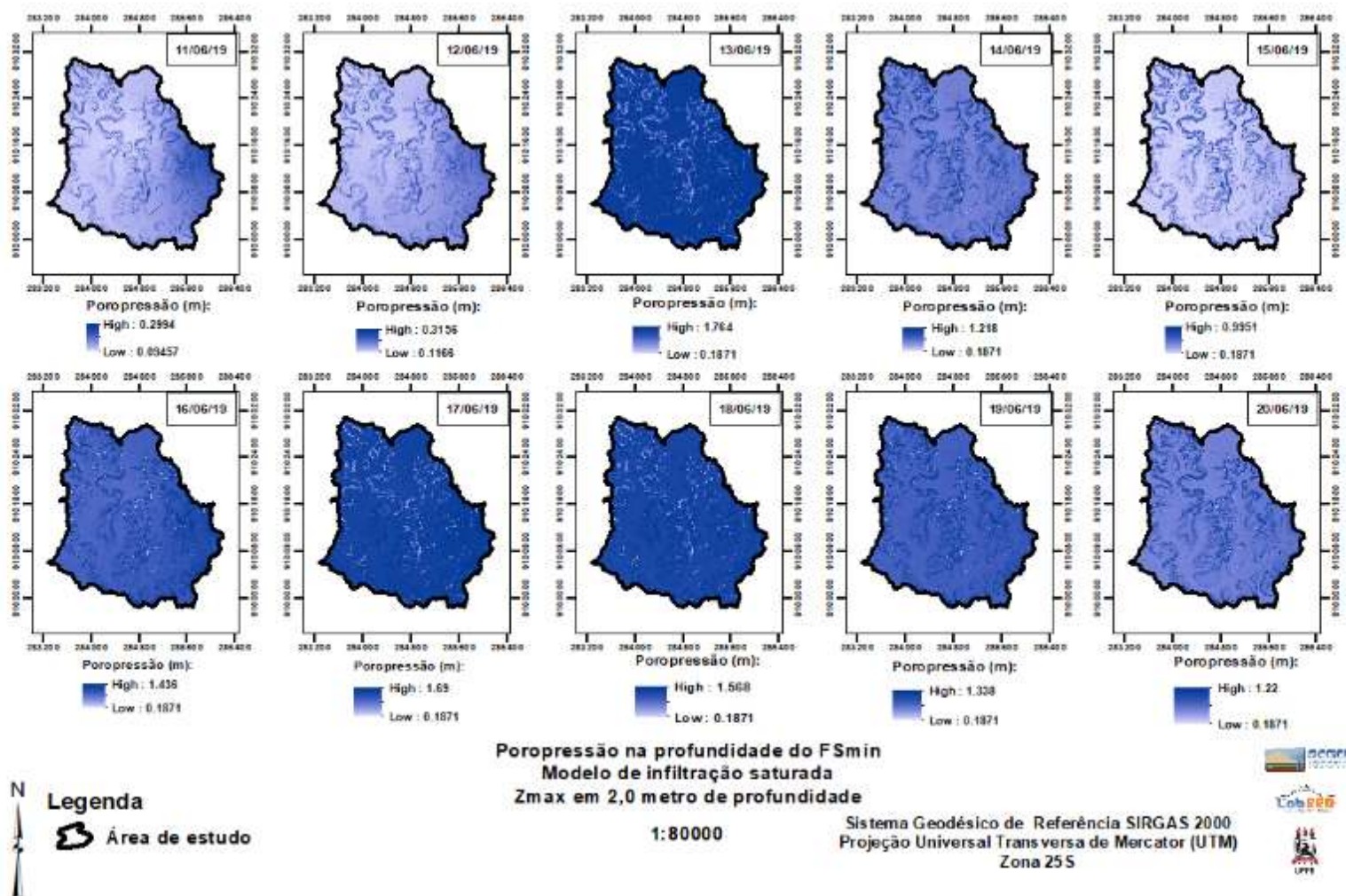
1:80000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



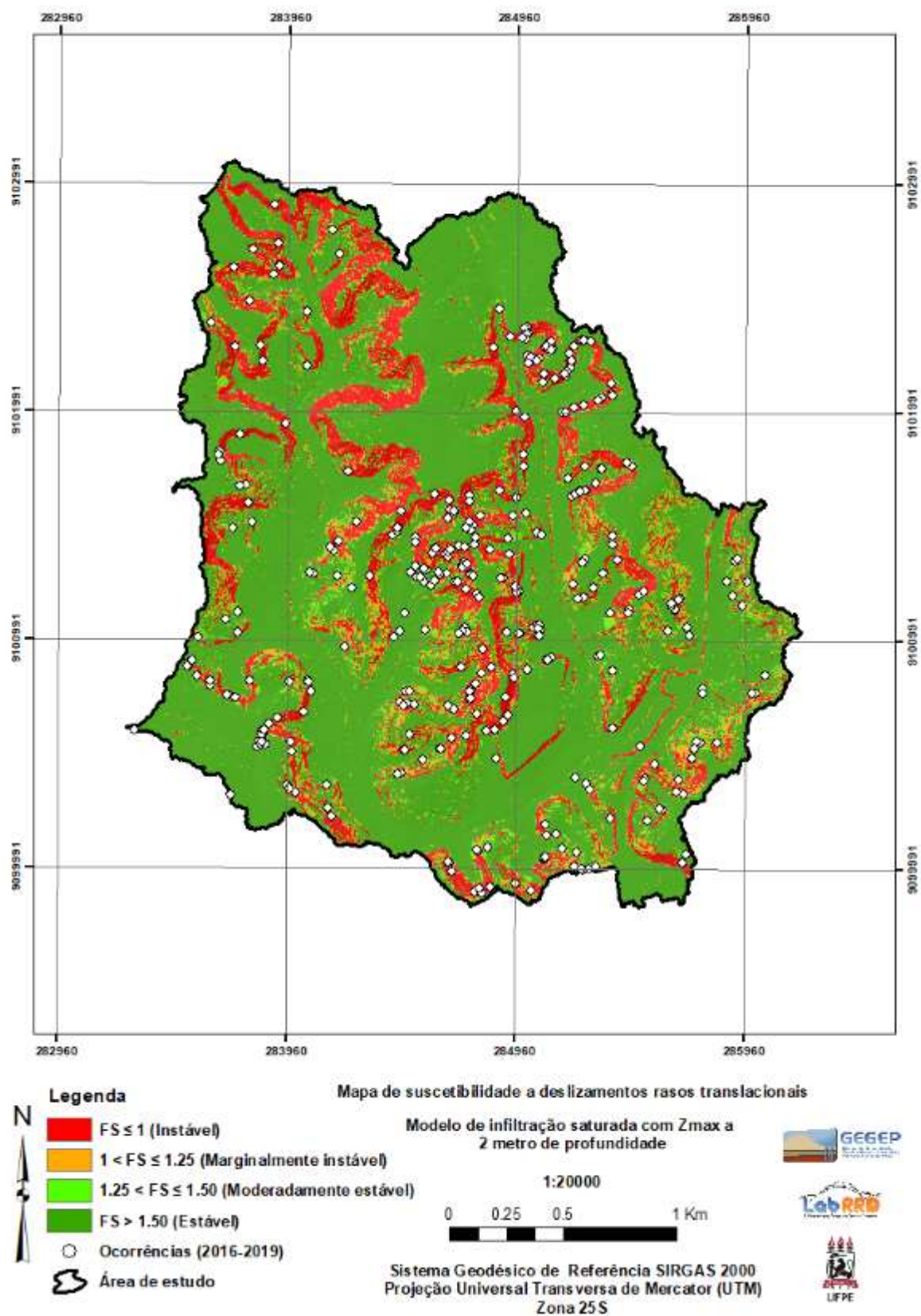
Fonte: O Autor (2022).

Figura 106 – Análise ASAT2: Variação da poropressão com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 107 – Análise ASAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

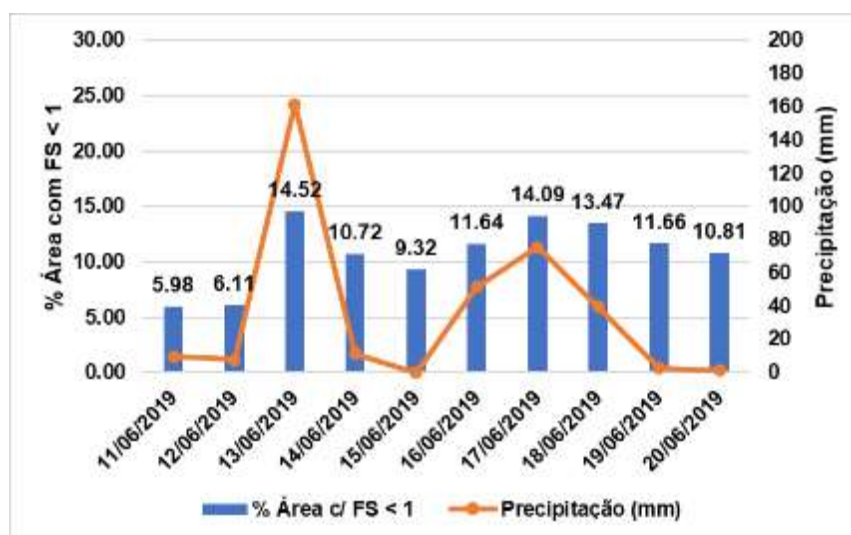


Fonte: O Autor (2022).

7.2.1.1.3 Análise ASAT3

Nesse cenário o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,00 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 108 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável foi sensível a precipitação, alcançando um valor referente a 14,52% no dia 13/06/19.

Figura 108 – Análise ASAT3: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 109 plota a distribuição espacial da área instável para todos os dias analisados. Os mapas mostram que a área classificada com $FS \leq 1,00$, aumentou consideravelmente no dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nos dias subsequentes essa área instável variou de acordo com a intensidade da chuva. Para esse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 3 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 110 apresenta a distribuição da poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . Os mapas mostram uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão no dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm. Nesse dia, em algumas localidades, a pressão hidrostática é igual a 1,932 m.

A distribuição de poropressão varia ao longo dos dias de acordo com a intensidade da chuva. Como na análise ASAT2, devido ao maior Z_{max} as precipitações

ocorridas no intervalo considerado não conseguiram manter o mesmo nível de poropressão alcançado no dia 13/06/19, apresentando variações acentuadas nos dias subsequentes. Além disso, a distribuição dos maiores valores de poropressão ocorre de maneira menos expressiva que o visto na análise ASAT2, devido a isso, a % de área instável varia ao longo dos dias de maneira menos acentuada que na análise ASAT2.

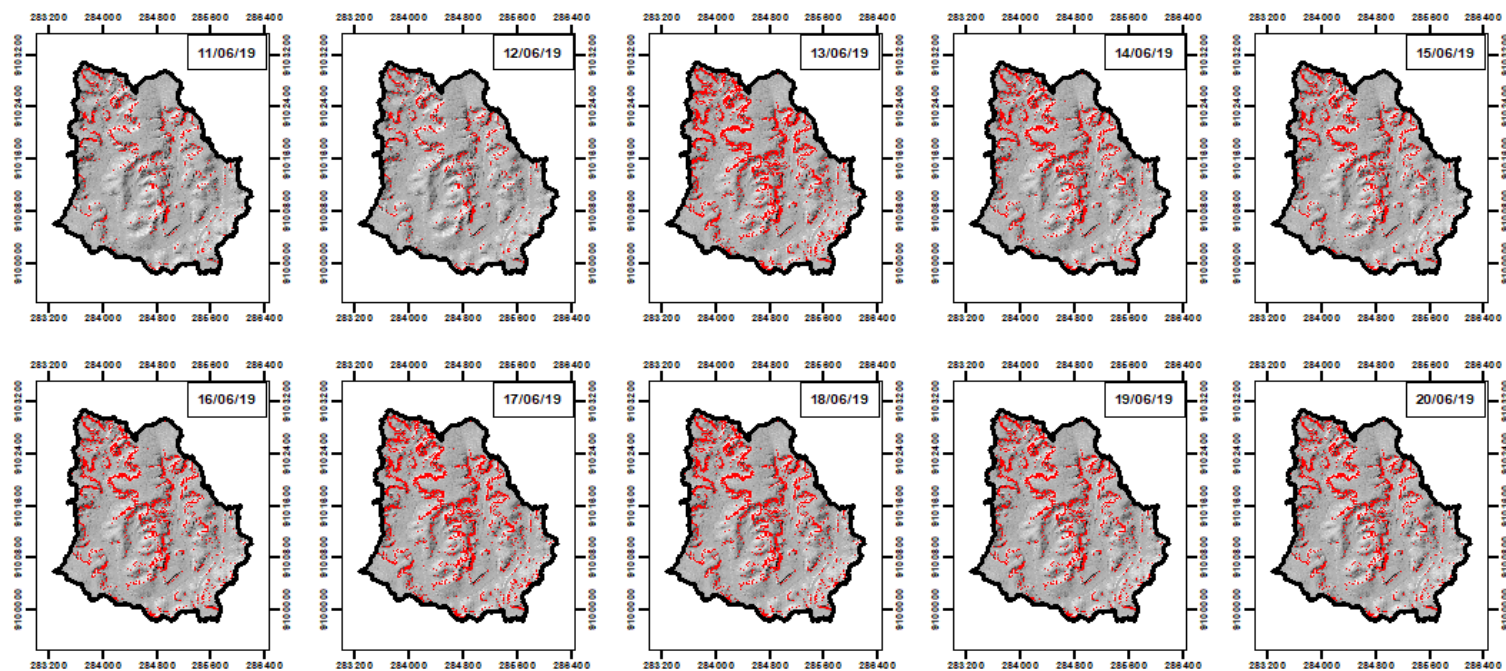
A Figura 111 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise ASAT3. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. A Tabela 57 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade por meio do método LR_{class} . A tabela mostra que 14,52% da área foi prevista como instável pelo modelo, abrangendo 74,67% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 77,00%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 77,00% de chance de incluí-lo.

Tabela 57 – Análise ASAT3: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	280	74,67	14,52	5,14	77,00
$1,00 < FS \leq 1,25$	14	3,73	5,65	0,66	9,90
$1,25 < FS \leq 1,50$	12	3,20	5,09	0,63	9,42
$FS > 1,50$	69	18,40	74,74	0,25	3,69
	375 (b)	100,00	100,00	6,68 (f)	100,00

Fonte: O Autor (2022).

Figura 109 – Análise ASAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Legenda

Área instável ($FS \leq 1,00$)

Área de estudo

Modelo de infiltração saturada
Zmax em 3 metros de profundidade

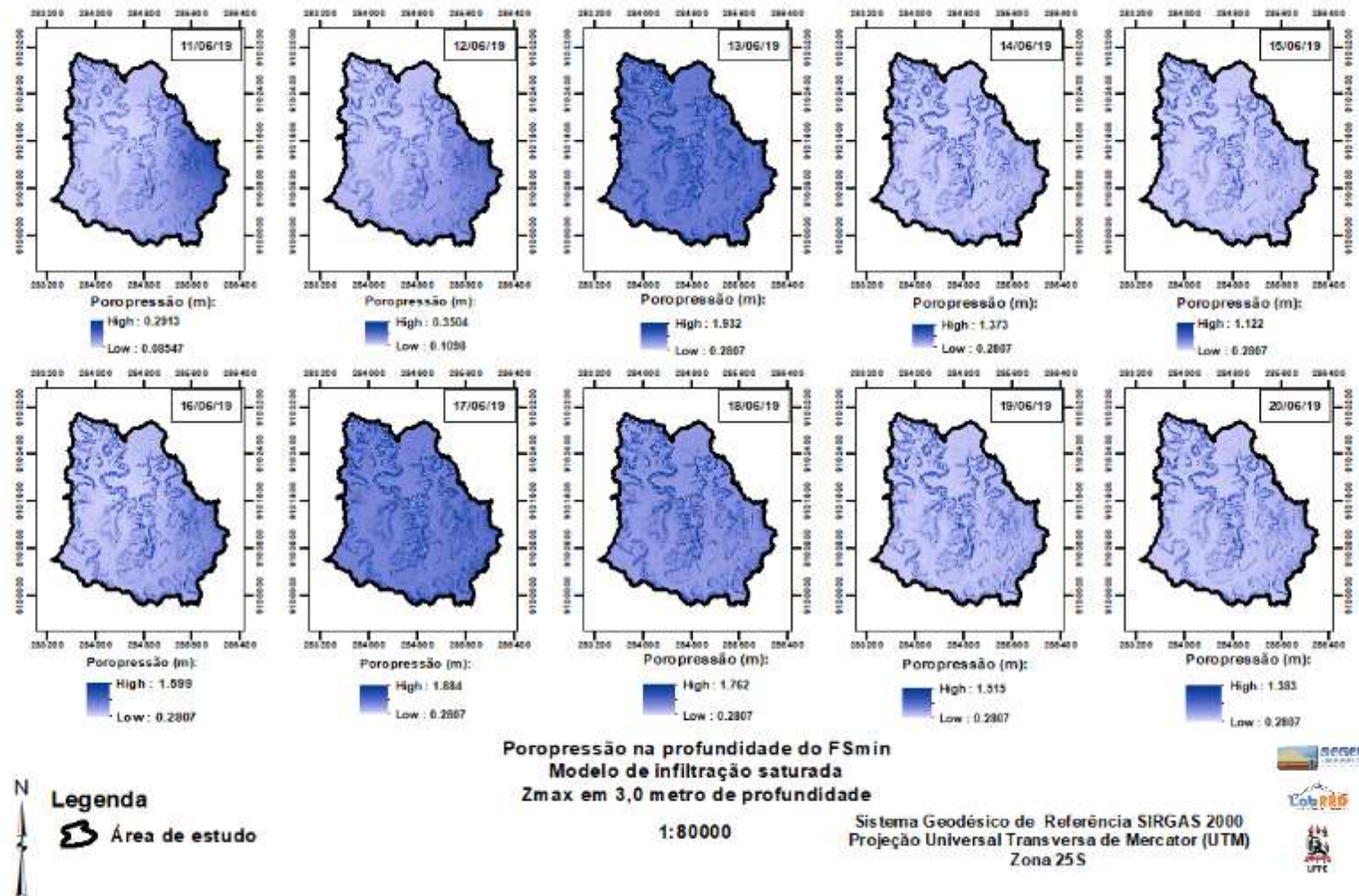
1:80000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



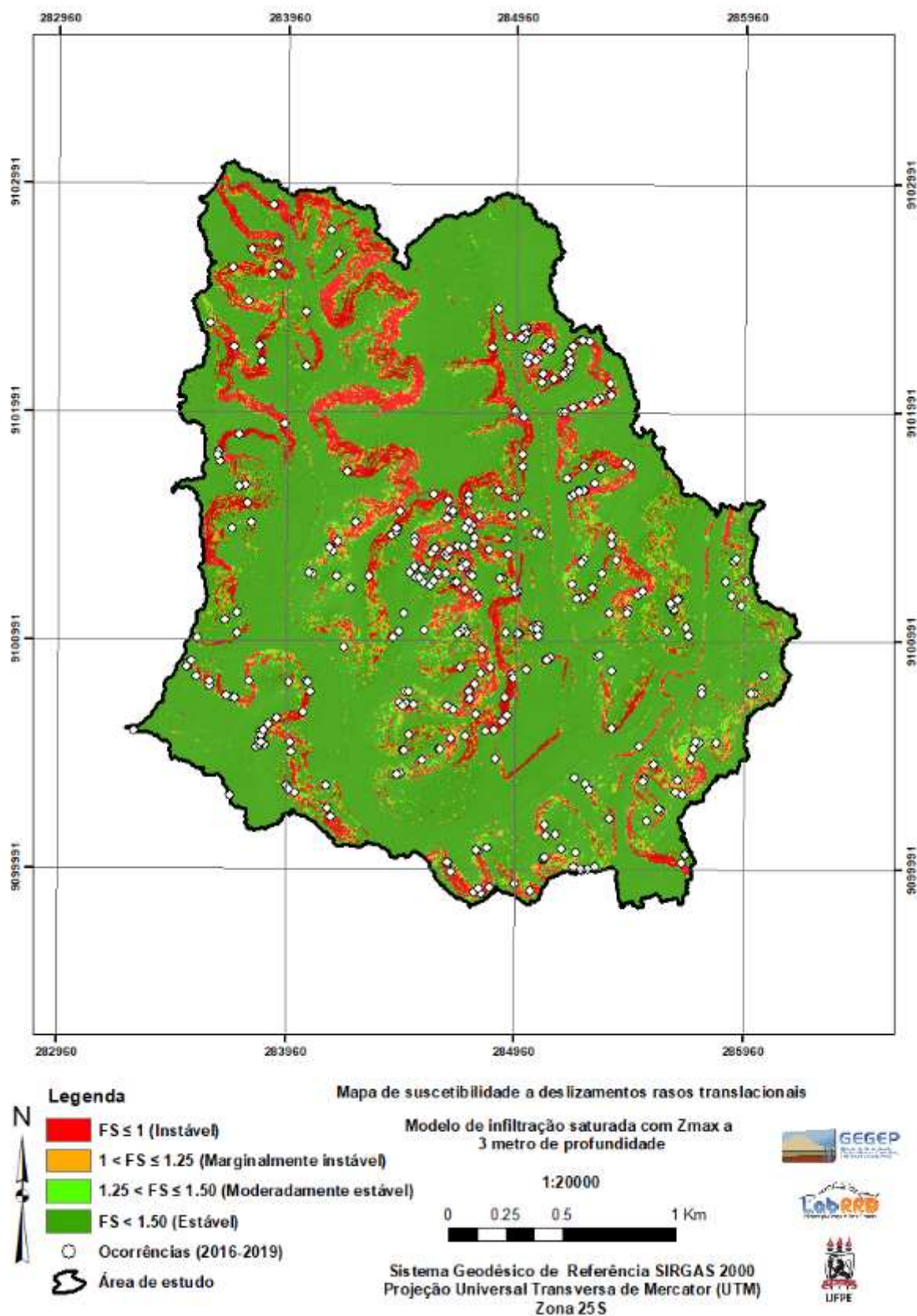
Fonte: O Autor (2022).

Figura 110 – Análise ASAT3: Variação da poropressão com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 111 – Análise ASAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.



Fonte: O Autor (2022).

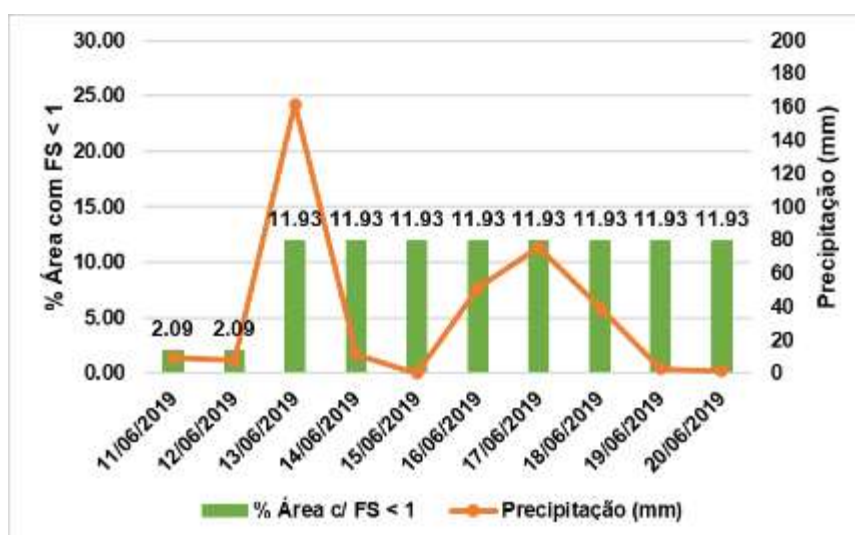
7.2.1.2 Análises NSAT do Cenário A

As análises do tipo NSAT foram realizadas utilizando o modelo de infiltração inicial não saturada para três valores de Z_{max} .

7.2.1.2.1 Análise ANSAT1

Nessa análise o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 1,00 metro de profundidade a partir da superfície. A Figura 112 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável aumentou, atingindo 11,93%, quando a precipitação correspondeu a 161,53 mm no dia 13/06/19. Esse percentual de área instável, alcançado no dia 13/06/19, se mantém constante até o último dia analisado (20/06/19).

Figura 112 – Análise ANSAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 113 plota uma série de mapas que mostram a distribuição espacial da área instável. Através desses mapas é observado um aumento consideravelmente da área instável no dia 13/06, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico dessa análise. Nos dias seguintes as áreas classificadas com $FS \leq 1,00$ não apresenta variação. Destaca-se que nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 1,00 metro a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 114 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao $FS_{\min}$. A sequência de mapas mostra uma mudança significativa das condições iniciais a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, e se mantém constante até 20/06/19. Nesse dia, em algumas localidades, a pressão hidrostática é igual 0,9418 m. Essa distribuição de poropressão se mantém constante até 20/06/19 (último dia analisado). Indicando que a chuva precipitada após o dia 13/06/19 conseguiu manter a mesma distribuição de poropressão. Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias explica porque a % porcentagem de área instável aumenta e se mantém constante entre 13/06/19 e 20/06/2019.

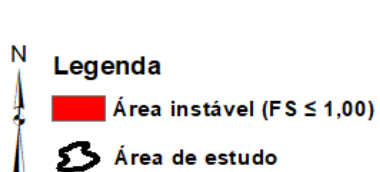
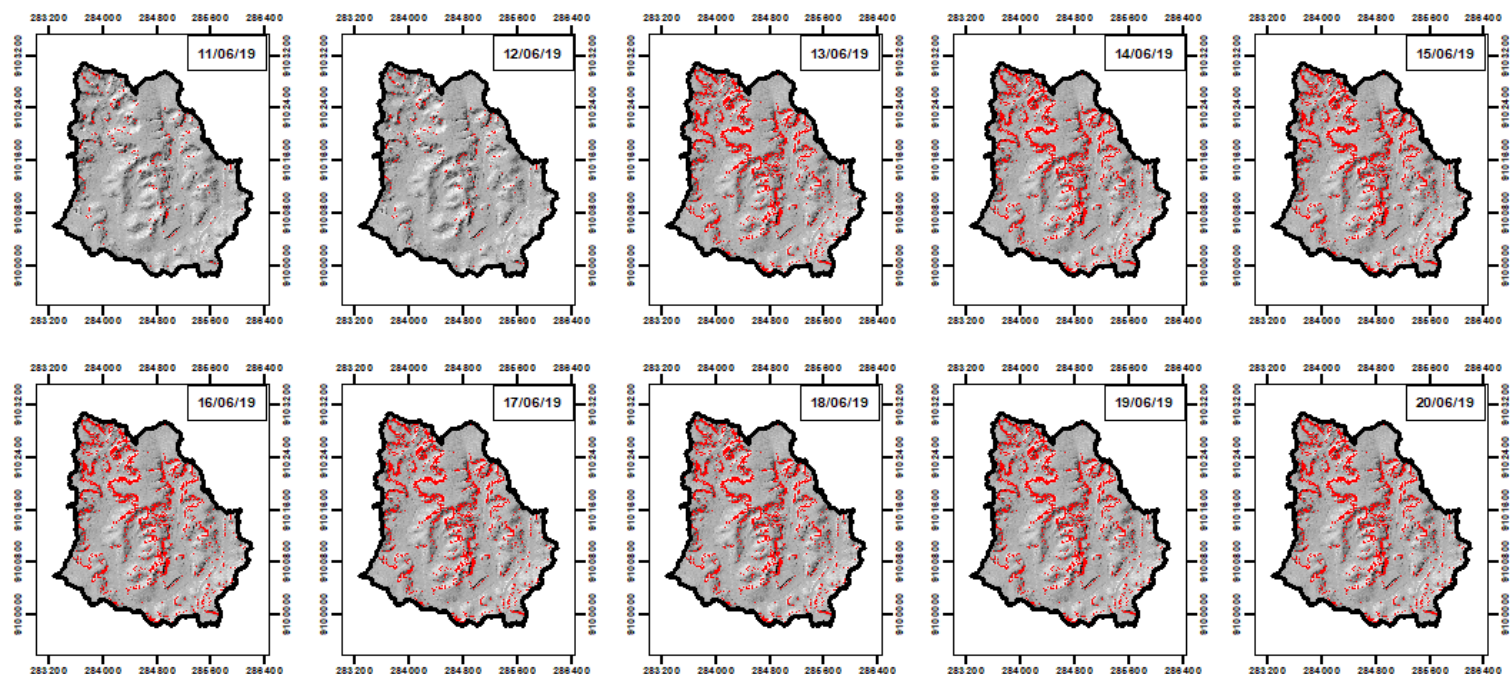
A Figura 115 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise ANSAT1. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. A Tabela 58 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade por meio do método LR_{class} . Essa tabela mostra que 11,93% da área foi classificada como instável abrangendo 72,80% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 80,52%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 80,52% de chance de incluí-lo.

Tabela 58 – Análise ANSAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	273	72,80	11,93	6,10	80,52
$1,00 < FS \leq 1,25$	16	4,27	7,07	0,60	7,96
$1,25 < FS \leq 1,50$	14	3,73	6,05	0,62	8,14
$FS > 1,50$	72	19,20	74,95	0,26	3,38
	375,00 (b)	100,00	100,00	8,10 (f)	100,00

Fonte: O Autor (2022).

Figura 113 - Análise ANSAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Modelo de infiltração não saturada
Zmax1 em 1 metro de profundidade

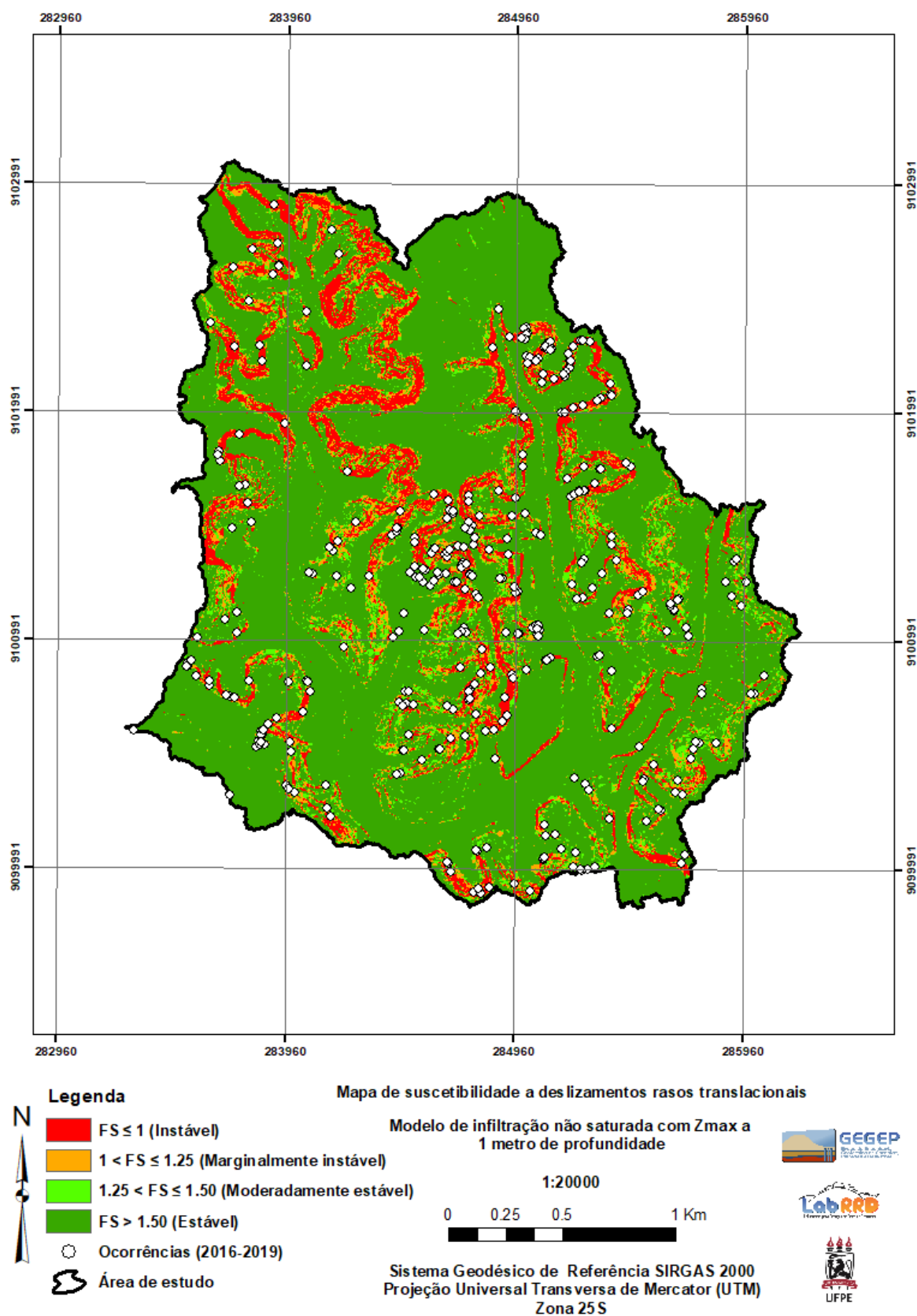
1:80000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



Fonte: O Autor (2022).

Figura 115 – Análise ANSAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

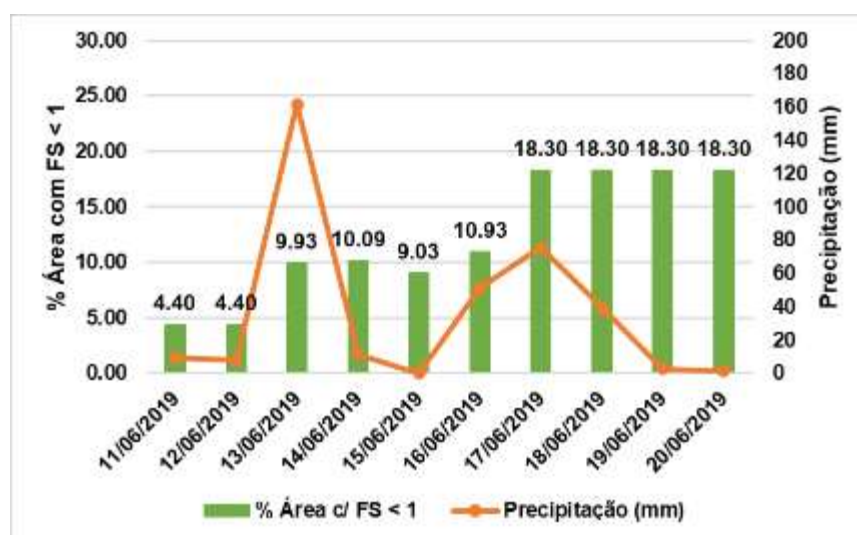


Fonte: O Autor (2022).

7.2.1.2.2 Análise ANSAT2

Nessa análise o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,0 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 116 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável aumenta com a precipitação, alcançando um resultado igual a 18,30%, quando a precipitação correspondeu a 75,53mm no dia 17/06/19.

Figura 116 – Análise ANSAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 117 apresenta a distribuição espacial da área instável para todos os dias analisados. A série de mapas mostra que a área classificada com $FS \leq 1,00$ aumentou a partir dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, alcançando maior valor no dia 17/06/19, sendo esse o primeiro dia mais crítico. No intervalo entre 17/06/19 e 20/06/19 a % área instável não apresenta variação. Além disso, nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 2 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 118 apresenta a distribuição da poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . Os mapas mostram uma mudança das condições iniciais de poropressão a partir do dia 13/06/19, nos dias seguintes é observado um aumento contínuo da poropressão, atingindo em alguns locais um valor correspondente a 1,884m no dia 16/06/19. No intervalo entre 16/06/19 e 20/06/19 a distribuição de poropressão se mantém constante, pois as chuvas nos dias seguintes conseguiram

manter o mesmo nível de valores, explicando porque a % de área instável se manteve constante entre 17/06/19 e 20/06/19. De acordo com Baum, Godt e Savage (2010), os resultados das análises realizadas utilizando a condição inicial não saturada são afetadas pelos efeitos da sucção na camada não saturada que atenua e atrasa a resposta da poropressão induzida pela chuva e, conseqüentemente, o momento de ruptura das encostas.

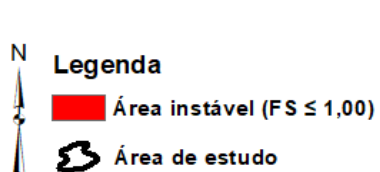
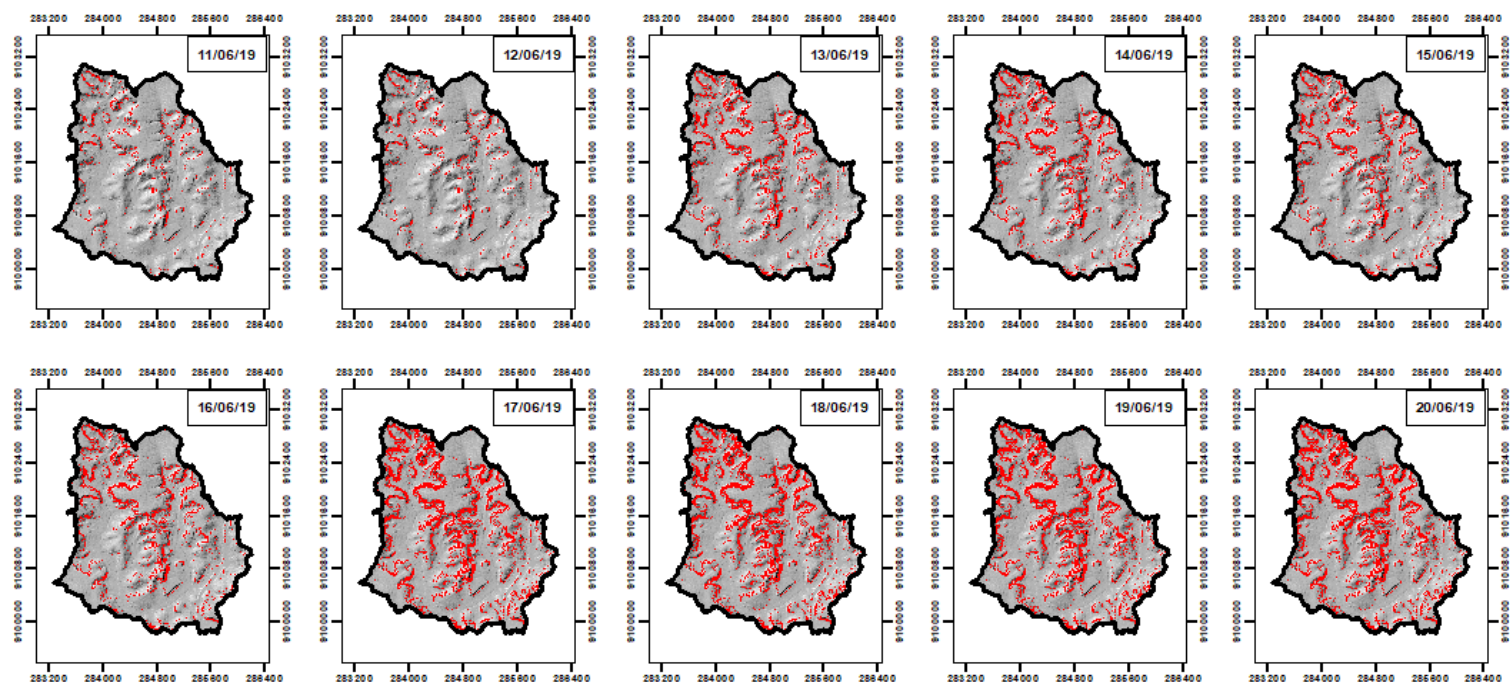
A Figura 119 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise ANSAT2. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. A Tabela 59 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade por meio do método LR_{class} . A tabela expõe que 18,30% da área foi classificada como instável e abrange 76,27% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 73,78%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 73,78% de chance de incluí-lo.

Tabela 59 – Análise ANSAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	286	76,27	18,30	4,17	73,78
$1,00 < FS \leq 1,25$	19	5,07	7,18	0,71	12,50
$1,25 < FS \leq 1,50$	12	3,20	5,82	0,55	9,74
$FS > 1,50$	58	15,47	68,71	0,23	3,98
	375 (b)	100,00	100,00	5,65 (f)	100,00

Fonte: O Autor (2022).

Figura 117 - Análise ANSAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Modelo de infiltração não saturada
Zmax em 2 metro de profundidade

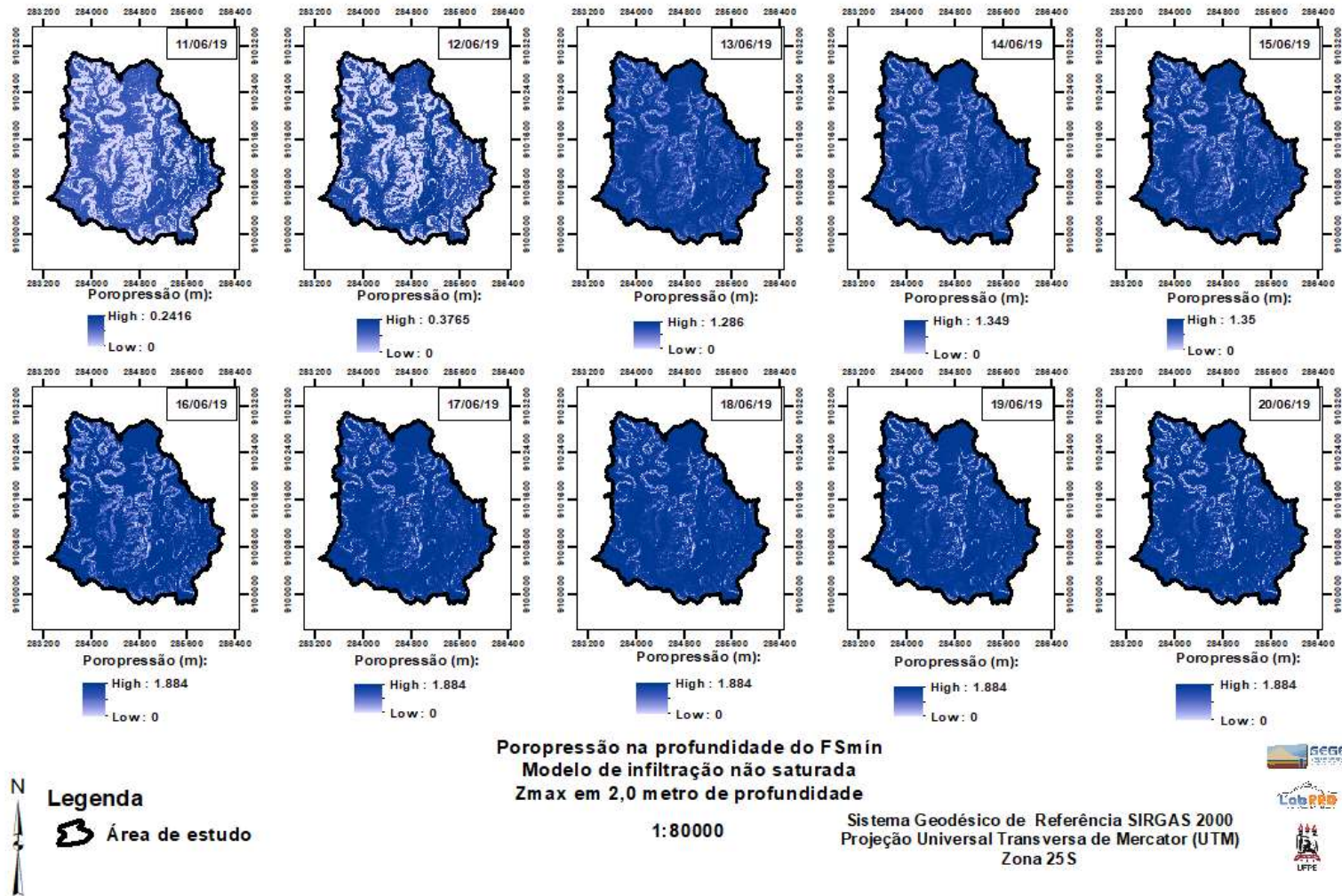
1:80000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



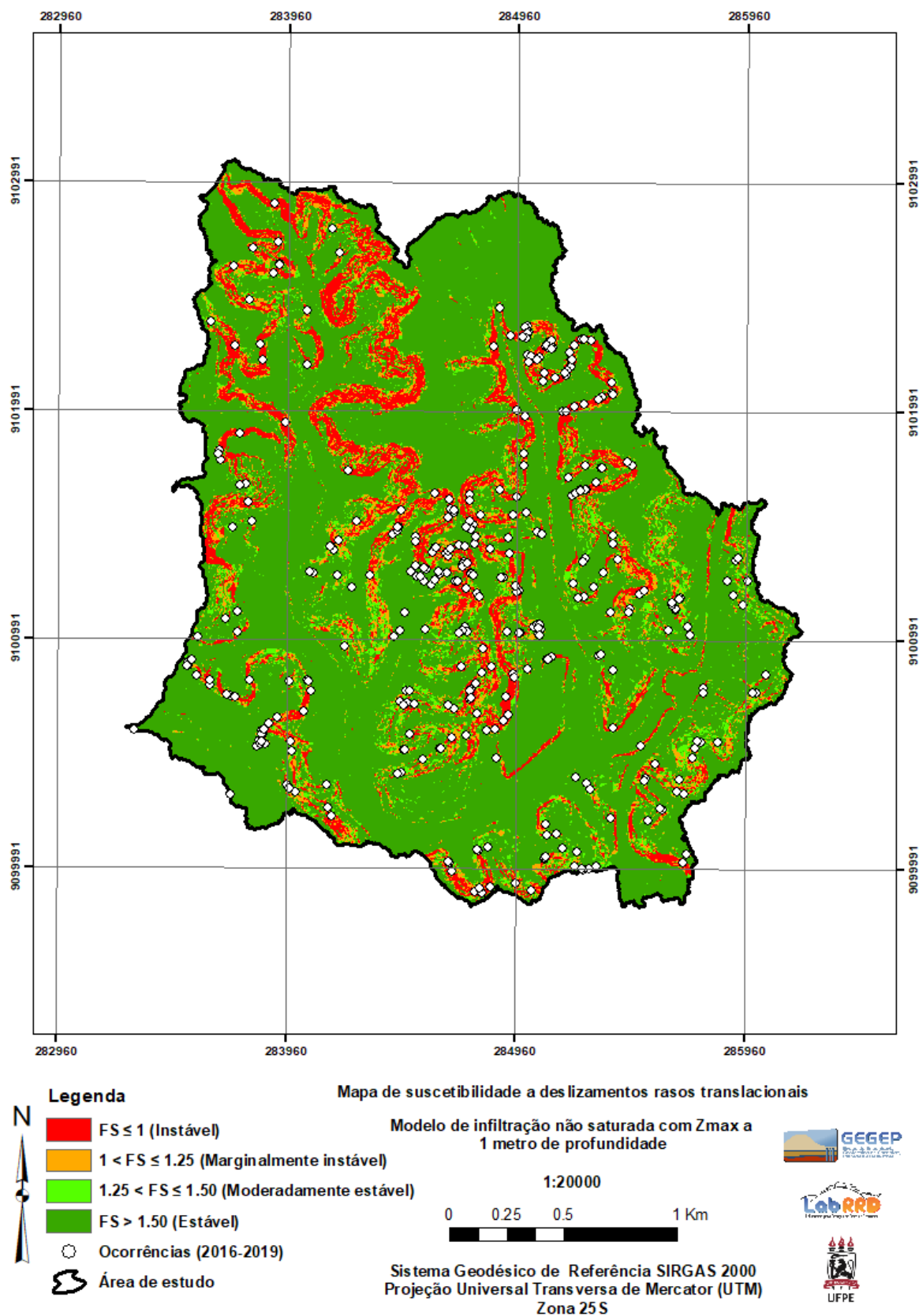
Fonte: O Autor (2022).

Figura 118 – Análise ANSAT2: Variação da poropressão com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 119 – Análise ANSAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

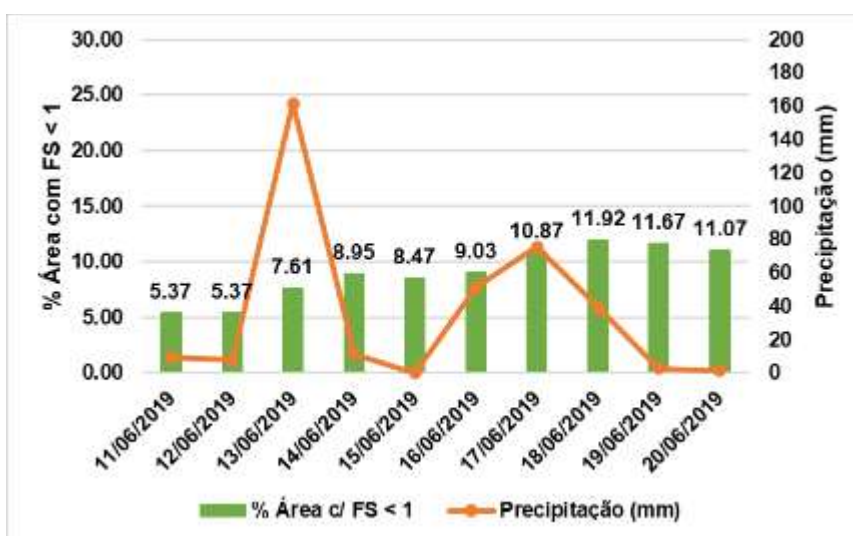


Fonte: O Autor (2022).

7.2.1.2.3 Análise ANSAT3

Na análise ANSAT3 o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,00 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 120 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável foi sensível a precipitação atingindo um resultado igual a 11,92% no dia 18/06/19.

Figura 120 – Análise ANSAT3: Relação entre a % da área com $FS \leq 1$ e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 121 apresenta a distribuição espacial área instável. Os mapas dispostos em ordem cronológica mostram que a área classificada com $FS \leq 1,00$, aumenta a partir do dia 13/06, devido a precipitação de 161,53mm, alcançando a maior distribuição em 18/06, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 3 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 122 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . A sequência de mapas mostra uma mudança considerável das condições iniciais de poropressão a partir do 13/06/19. Nos dias seguintes é observado um aumento progressivo da pressão hidrostática até 19/06/19, atingindo nessa data um valor equivalente a 2,187m em algumas localidades.

As precipitações ocorridas no intervalo considerado aumentaram a poropressão de forma progressiva alcançando maior resultado em 19/06/19. Porém, ao contrário da análise ANSAT2, essa mesma precipitação não conseguiu manter o mesmo nível de poropressão alcançado no dia mais crítico (19/06/19), devido ao maior efeito da camada não saturada, em decorrência do maior valor de Z_{max} adotado, conseqüentemente, a % de área instável varia ao longo dos dias de maneira menos acentuada que na análise ANSAT2.

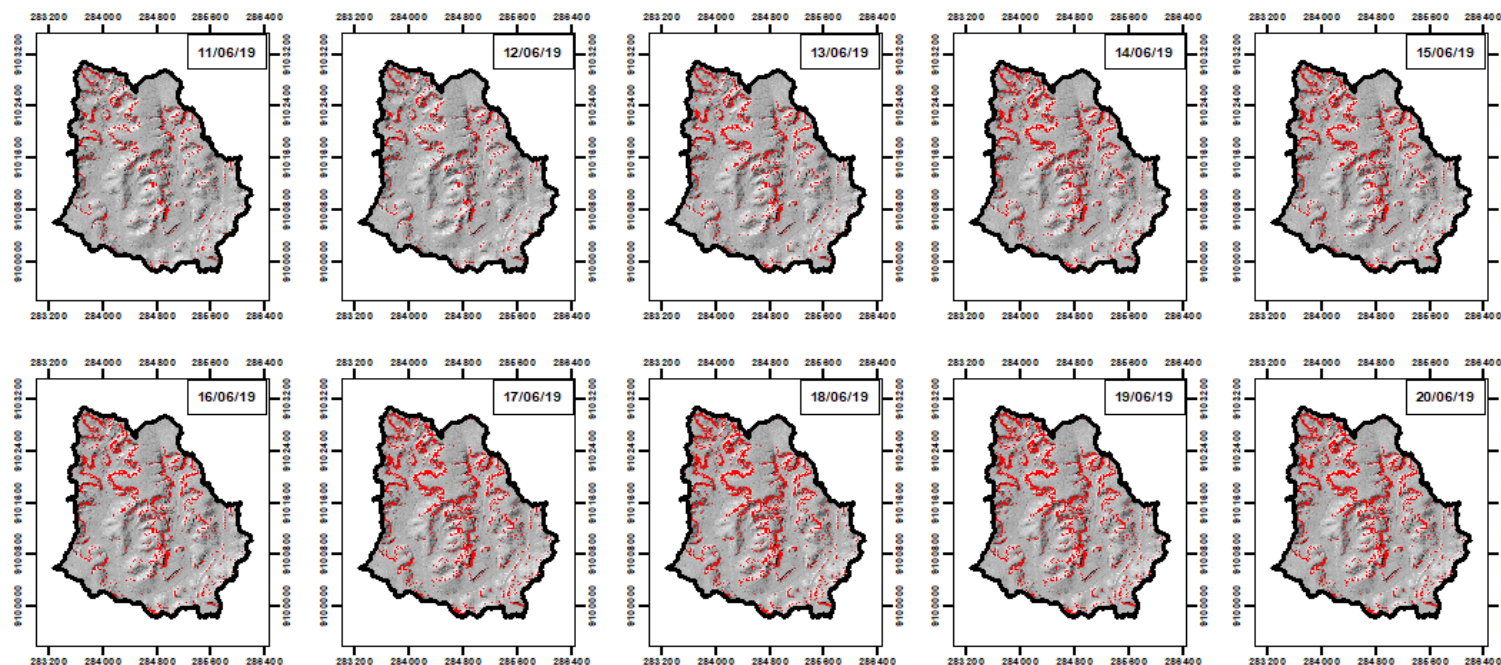
Figura 123 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise ANSAT3. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. A Tabela 60 apresenta a validação desse mapa por meio do método LR_{class} . A tabela expõe que 11,92% da área foi classificada como instável, abrangendo 72,53% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 81,23%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 81,23% de chance de incluí-lo.

Tabela 60 – Análise ANSAT3: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	272	72,53	11,92	6,08	81,23
$1,00 < FS \leq 1,25$	18	4,80	7,96	0,60	8,05
$1,25 < FS \leq 1,50$	13	3,47	6,38	0,54	7,25
$FS > 1,50$	72	19,20	73,73	0,26	3,48
	375 (b)	100,00	100,00	7,49 (f)	100,00

Fonte: O Autor (2022).

Figura 121 – Análise ANSAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Legenda

Área instável ($FS \leq 1,00$)

Área de estudo

Modelo de infiltração não saturada
Zmax em 3 metro de profundidade

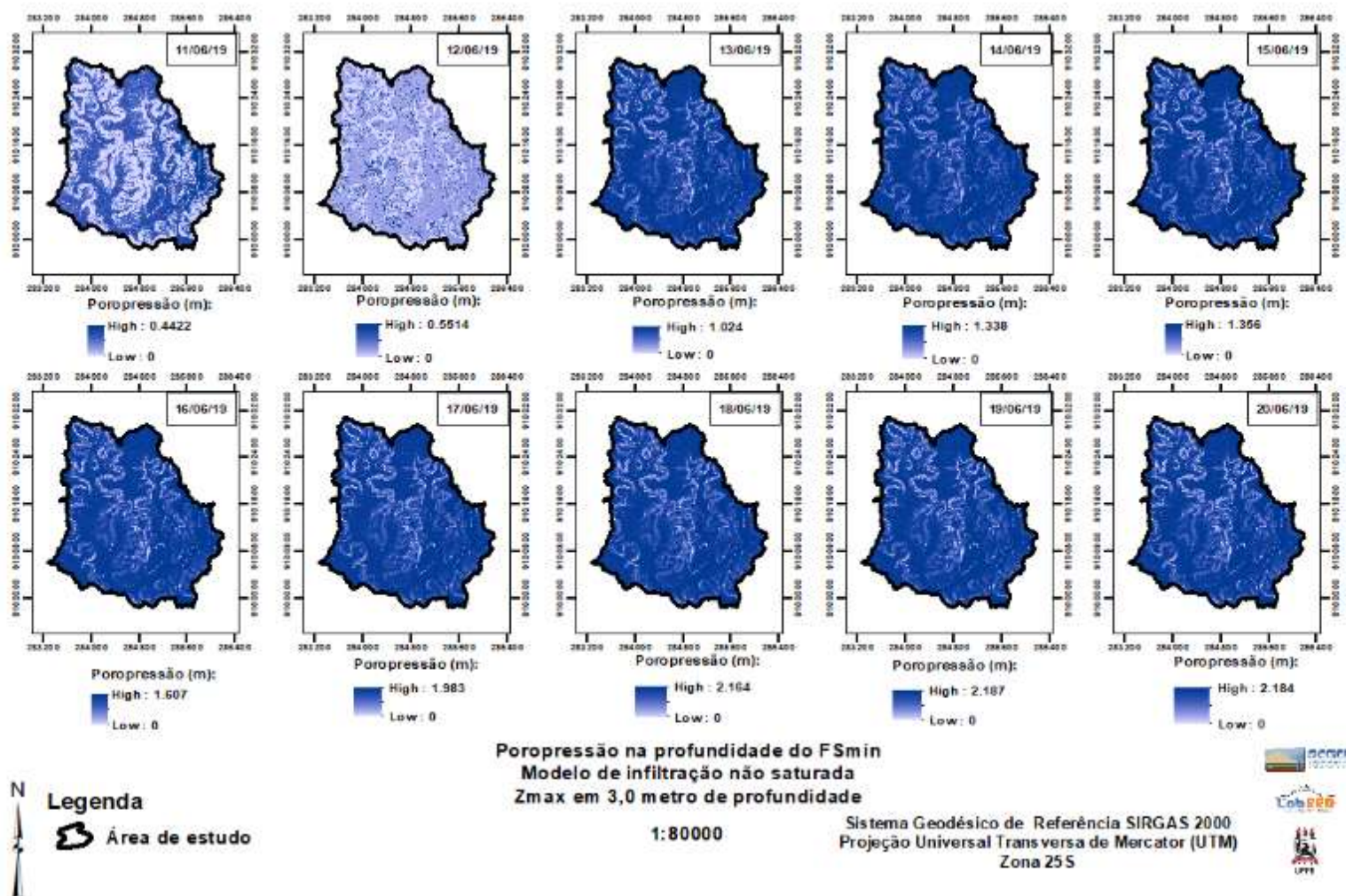
1:80000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



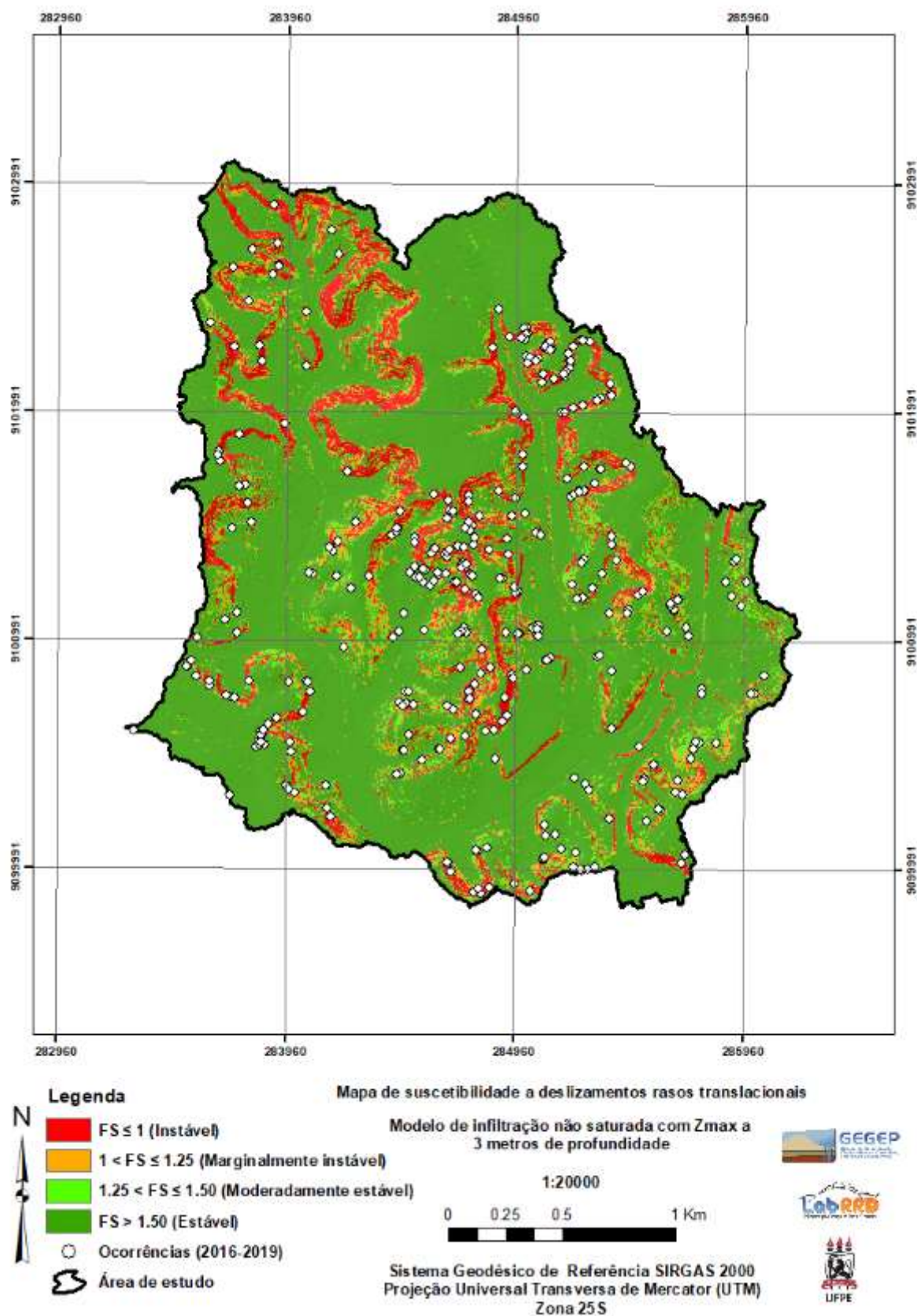
Fonte: O Autor (2022).

Figura 122 - Análise ANSAT3: Variação da poropressão com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 123 – Análise ANSAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

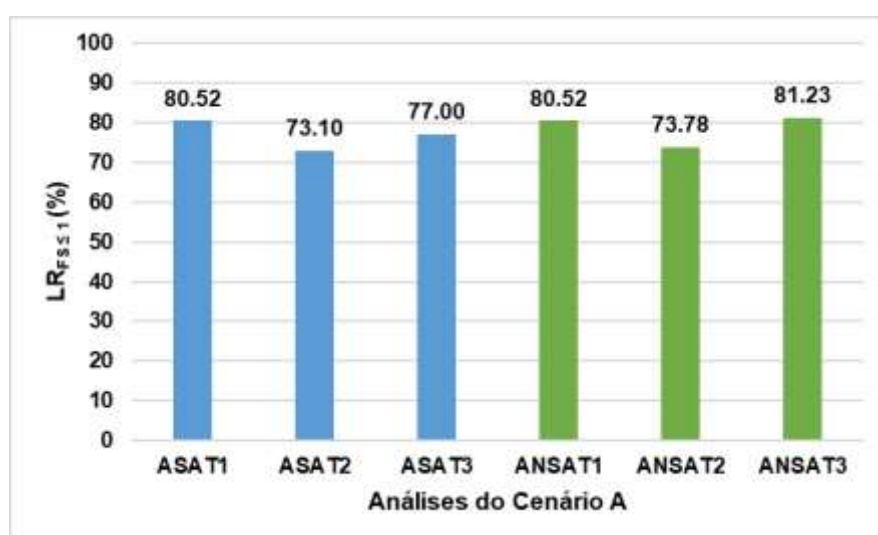


Fonte: O Autor (2022).

7.2.1.3 Comparação dos resultados do Cenário A

A Figura 124 apresenta a comparação da $\%LR_{FS \leq 1,00}$ das análises do Cenário A. No geral, os mapas de suscetibilidade desse cenário mostram que existe concordância entre os locais de ocorrência e a classe referente ao $FS \leq 1,00$. De acordo com o estabelecido por Park, Nikhil e Lee (2013) todos os resultados são classificados como bom, dado que $\%LR_{FS \leq 1,00} \geq 70\%$. Devido a melhor ponderação entre a % de área instável e o número de acertos dos pontos de deslizamento a análise ANSAT3 é a mais precisa do Cenário A, apresentando $\%LR_{FS \leq 1,00} = 81,23\%$.

Figura 124 – Comparação da $\%LR_{FS \leq 1}$ para as análises do Cenário A.



Fonte: O Autor (2022).

A validação também mostrou que a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ apresentou resultados dentro do intervalo dos valores encontrados em outras pesquisas realizadas com o modelo TRIGRS como Park, Nikhil e Lee (2013) que obteve $\%LR_{FS \leq 1,00} = 70,30\%$ nas análises realizadas na Montanha Woomyeon em Seoul na Coreia do Sul, considerando uma precipitação de 470 mm que ocorreu entre 26-27 de julho de 2011. Viet et al. (2017), obteve $\%LR_{FS \leq 1,00} = 75,87\%$ após refinar as análises realizadas por Park, Nikhil e Lee (2013), utilizando o modelo de infiltração inicial não saturada e os parâmetros especializados por meio de zonas. Marin, Velasquez e Sánchez (2021), alcançou $\%LR_{FS \leq 1,00} = 97,47\%$ na retroanálise realizadas na bacia La Liboriana localizada nos Andes colombianos, considerando os eventos ocorridos em 18 de maio de 2015.

Desse modo, conclui-se que o TRIGRS gerou resultados satisfatórios e coerentes, permitindo identificar as áreas mais susceptíveis a deslizamentos rasos em decorrência dos acréscimos de poropressão causado pela elevação do índice pluviométrico. Por via de regra, os resultados apresentaram comportamento dentro do previsto pela literatura, por exemplo, as áreas classificadas como instáveis nas análises realizadas com o TRIGRS coincidiram com aquelas que apresentam as encostas mais elevadas e íngremes, com inclinações que superam os 27°.

Esses resultados concordam com o observado por Fernandes et al. (2001); Guimarães et al. (2003); Salciarini et al. (2006); Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010); Listo e Vieira (2012); Michel et al. (2014) e Vieira et al. (2018) que afirmam que há influência da topografia sobre os resultados de modelos que combinam modelos hidrológicos e de estabilidade. Nas pesquisas que utilizaram o TRIGRS, os autores verificaram que a área prevista como instável é extremamente dependente da inclinação e elevação da área considerada, devido aos efeitos da topografia no cálculo do Fator de Segurança (FS).

Ademais, nesse cenário, a área classificada como instável, apresenta resultados semelhantes entre as análises do tipo SAT e NSAT, principalmente quando o Z_{max} é igual a 1,00 e 2,00 metros. Para Z_{max} igual a 1,00m a % de área instável do primeiro dia mais crítico (13/06/19), é igual 11,93% para ambas análises. Para o Z_{max} igual a 2,00m a % de área instável do primeiro dia mais crítico é igual 18,30%. Porém, o dia mais crítico ocorre em datas diferentes, 13/06/19 para a análise ASAT2 e 17/06/19 para a análise ANSAT2.

Nas análises em que o Z_{max} é igual a 3,00 m, é observado uma diferença na % de área instável entre as análises do tipo SAT e NSAT. A análise ASAT3 apresenta uma % área instável igual a 14,52%, em contrapartida a análise ANSAT3 apresenta uma % de área instável igual a 11,92%. O primeiro dia mais crítico também ocorreu em datas distintas, 13/06/19 para a análise ASAT3 e 18/06/19 para a análise ANSAT3.

Esses resultados se apresentaram dentro do previsto por Baum, Godt e Savage (2010). Segundo esses autores a variação espacial da poropressão ocorre em função da topografia, profundidade do solo (Z_{max}) e das propriedades hidráulicas. Esses também constataram que nas análises realizadas considerando a condição inicial saturada a poropressão positiva se desenvolve mais cedo, gerando resultados mais

conservadores. Por outro lado, os resultados das análises realizadas considerando a condição inicial não saturada são afetadas pela sucção da camada não saturada que atenua e atrasa a resposta da poropressão induzida pela chuva e consequentemente o momento de ruptura das encostas.

Desse modo, para esse cenário, conclui-se que quanto maior o Z_{max} e a profundidade inicial do nível de água, consequentemente maior será o efeito da camada não saturada na infiltração da chuva, explicando, assim, as diferentes datas de previsão do dia mais crítico entre as análises do tipo SAT e NSAT. Em razão disso, a análise ANSAT3 é a mais precisa do Cenário A, apresentando $\%LR_{FS \leq 1,00} = 81,23\%$.

Outro fator a ser considerado é a % de área instável inicial. Dado o baixo índice pluviométrico do dia 11/06, é possível verificar que o modelo apresenta uma % de área instável inicial que tende a crescer à medida que se aumenta a profundidade Z_{max} . Segundo Baum, Godt e Savage (2010), a profundidade do solo afeta a resistência ao cisalhamento, reduzindo a contribuição do ângulo de atrito e da coesão à medida que Z_{max} aumenta.

Adicionalmente a % de área instável inicial pode ser explicada pela interferência antrópica como a presença de cortes realizadas sem critério técnico. Além da impossibilidade de incorporar no modelo a existência de estruturas de contenção e outras intervenções de cunho antrópico presentes na área de estudo. Em seus estudos Avilá et al. (2020) também pondera a impossibilidade de considerar alguns aspectos da influência antrópica nas modelagens realizadas com TRIGRS e como isso pode afetar os resultados do modelo.

7.3 RESULTADOS DO CENÁRIO B

Nesse item serão apresentados e comparados os resultados do Cenário B.

7.3.1.1 Análises SAT do Cenário B

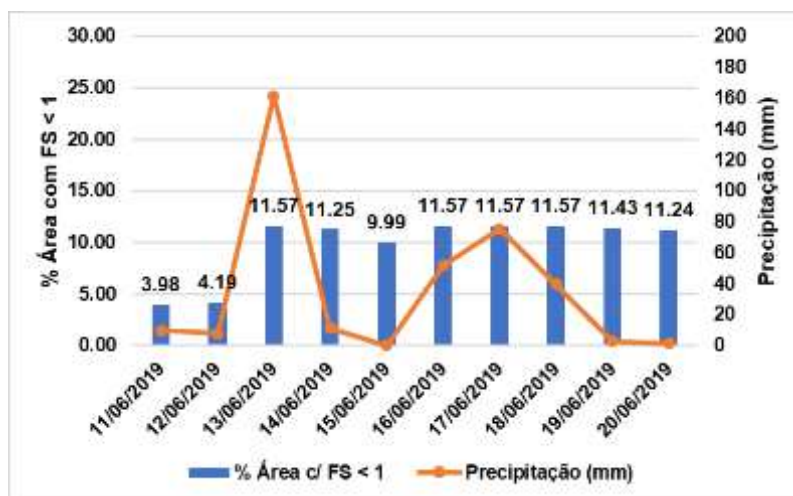
As análises do tipo SAT foram realizadas utilizando o modelo de infiltração saturada para três valores de Z_{max} .

7.3.1.1.1 **Análise BSAT1**

Nesse cenário o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 1,00 metro de profundidade a partir da superfície. A Figura 125 apresenta a relação entre % de área instável (classificada com $FS \leq$

1,00) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável aumenta, atingindo 11,57%, quando a precipitação correspondeu a 161,53mm, no dia 13/06. A partir dessa data o percentual de área instável varia de maneira sutil até o último dia de análise (20/06/19).

Figura 125 – Análise BSAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 126 plota a distribuição espacial da área instável para todos os dias analisados. A sequência de mapas mostra que a área classificada com $FS \leq 1,00$, aumentou consideravelmente no dia 13/06, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nos dias seguintes a área classificada com $FS \leq 1,00$, não apresenta uma variação expressiva. Destaca-se que nesse cenário o $FS_{\min}$ foi calculado na profundidade de 1 metro a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao $Z_{\max}$.

A Figura 127 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao $FS_{\min}$. Os mapas dispostos em ordem cronológica mostram que a mudança mais significativa das condições iniciais de poropressão ocorre a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm. Nesse dia, em algumas localidades, foi registrado um valor de pressão hidrostática correspondente a 0,9971m.

Nessa análise mesmo cada zona apresentando parâmetros geotécnicos e hidrológicos diferentes, a distribuição de poropressão varia de maneira sutil até 20/06/19 (último dia analisado). Indicando que a chuva precipitada após o dia 13/06/19 conseguiu manter a mesma distribuição de poropressão. Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias explica porque a % porcentagem de área instável aumenta e se mantém quase constante entre 13/06/19 e 20/06/2019.

A Figura 128 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos da Análise BSAT1. Esse mapa trata-se do primeiro dia mais crítico da análise atual e apresenta a classificação do FS em quatro classes, assim como os locais de ocorrência de deslizamentos registrados entre 2016 e 2019. O mapa mostra que em algumas localidades, muitas ocorrências não foram previstas pela área instável. Essas ocorrências não previstas pelo modelo estão localizadas na área da Zona 4, que possui a maior coesão entre as quatro zonas de propriedades consideradas, refletindo assim a influência desse parâmetro no cálculo do FS. Segundo Marin, Velasquez e Sánchez (2021), a coesão é o parâmetro que mais afeta a estabilidade.

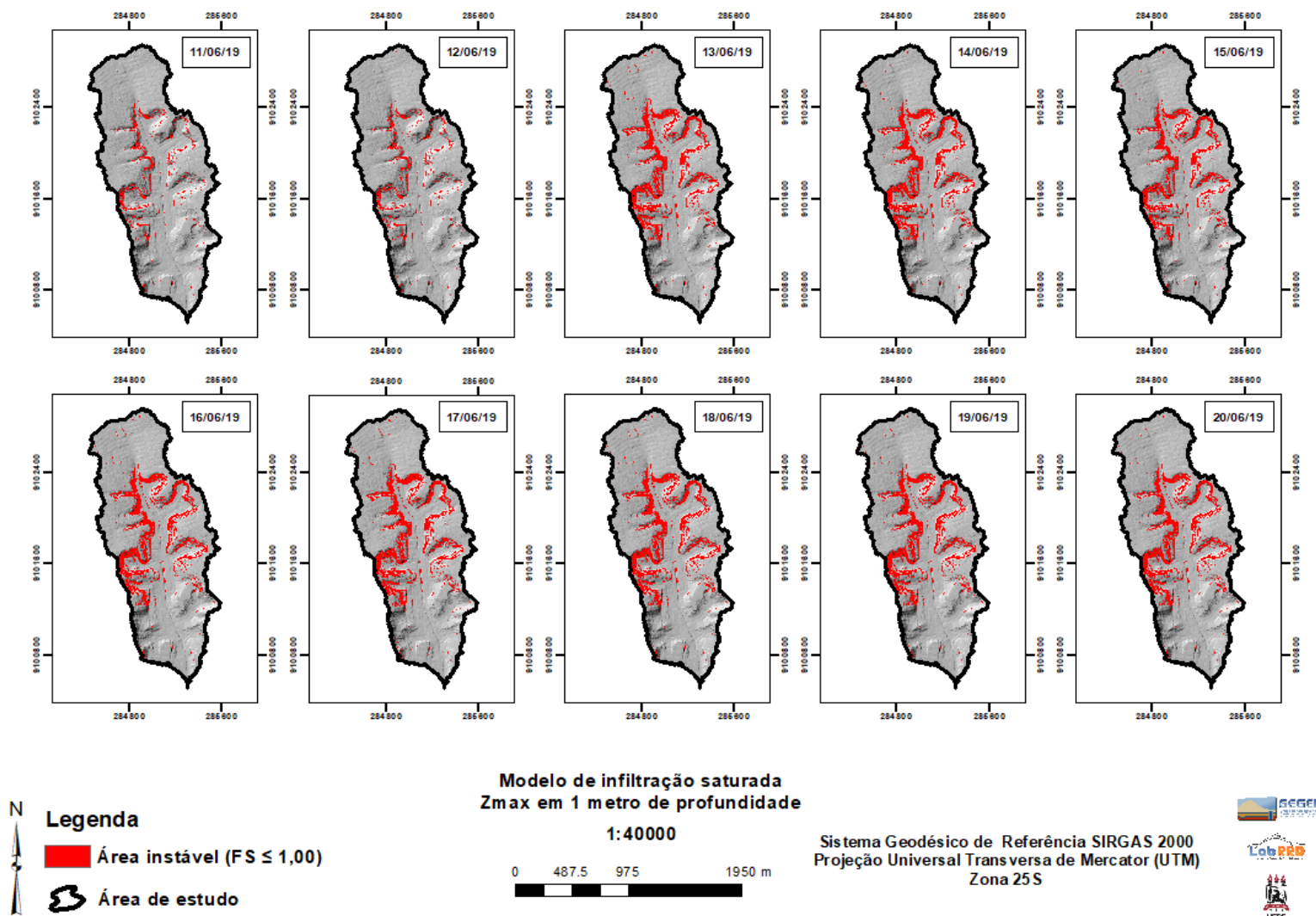
A Tabela 61 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{class} . Através dela constata-se que 11,57% da área foi classificada como instável, abrangendo 63,20% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 52,03%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 52,03% de chance de incluí-lo.

Tabela 61 – Análise BSAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento raso por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	79	63,20	11,57	5,46	52,03
$1,00 < FS \leq 1,25$	19	15,20	5,26	2,89	27,49
$1,25 < FS \leq 1,50$	12	9,60	4,81	2,00	19,02
$FS > 1,50$	15	12,00	78,36	0,15	1,46
	125 (b)	100,00	100,00	10,50 (f)	100,00

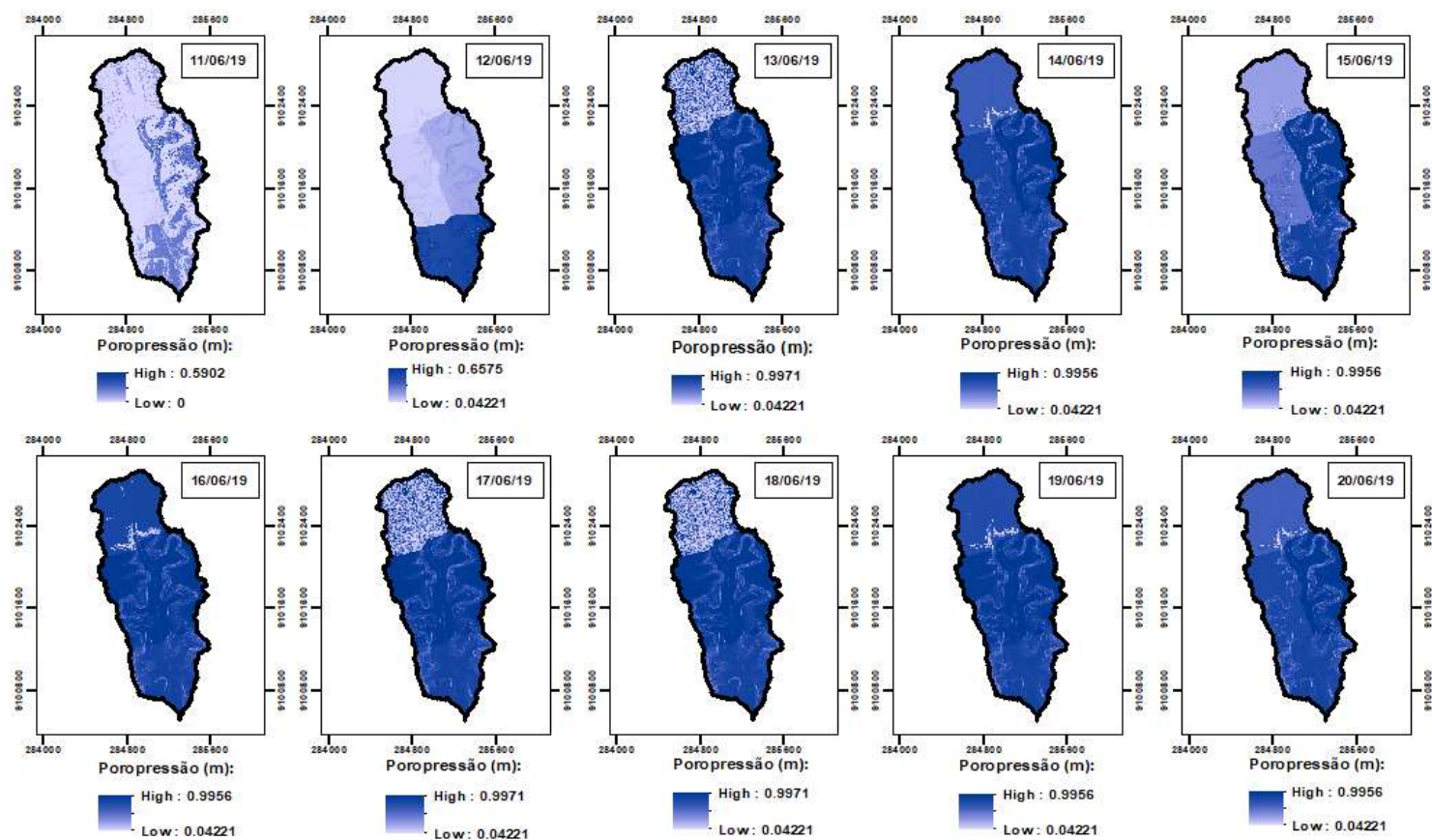
Fonte: O Autor (2022).

Figura 126 – Análise BSAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 127 – Análise BSAT1: Variação da poropressão com a precipitação.



Legenda



Área de estudo

Poropressão na profundidade do FSmin
Modelo de infiltração saturada
Zmax em 1 metro de profundidade

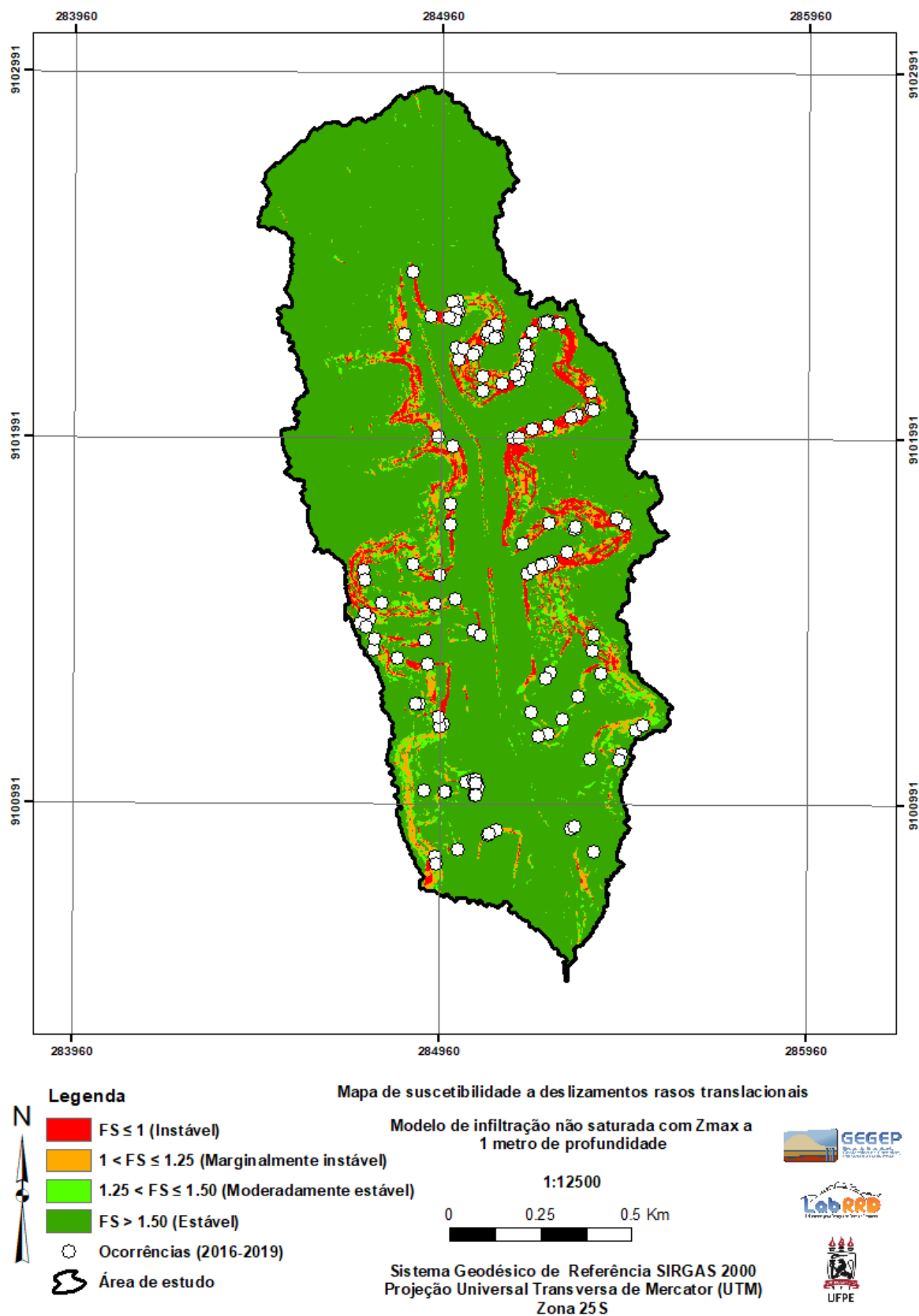
1:50000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



Fonte: O Autor (2022).

Figura 128 – Análise BSAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

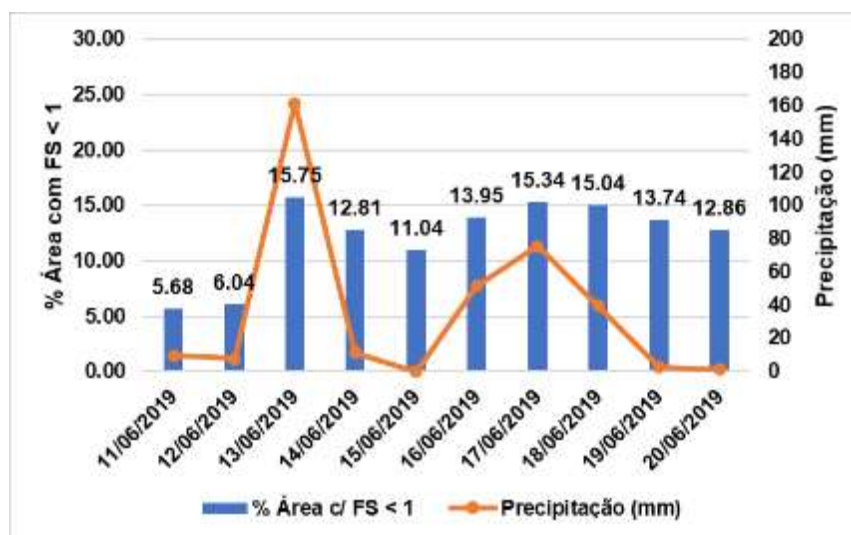


Fonte: O Autor (2022).

7.3.1.1.2 Análise BSAT2

Na Análise BSAT2 o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,00 metros de profundidade, a partir da superfície. A Figura 129 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que % de área instável variou de acordo com a intensidade da chuva. Alcançando no dia 13/06/19 um valor referente a 15,75%.

Figura 129 – Análise BSAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 130 plota a distribuição espacial da área instável. Os mapas mostram que essa área aumentou consideravelmente no dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico da análise BSAT2. Nos dias subsequentes a área instável variou de acordo com a intensidade da chuva. Além disso, nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 2 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 131 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . A sequência de mapas mostra uma mudança significativa das condições iniciais de poropressão no dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm. Nesse dia, em algumas localidades, a pressão hidrostática alcança valor igual a 1,991 m.

Os valores de poropressão nos dias subsequentes apresentam variação seguindo a intensidade da chuva. Porém, devido cada zona possuir parâmetros hidrológicos distintos, o regime de infiltração das águas da chuva é diferente em cada

uma delas, consequentemente, a distribuição de poropressão dentro da área varia de maneira não uniforme, explicando, assim, porque a área instável varia ao longo dos dias, mesmo quando o valor da poropressão máxima permanece constante na Figura 131.

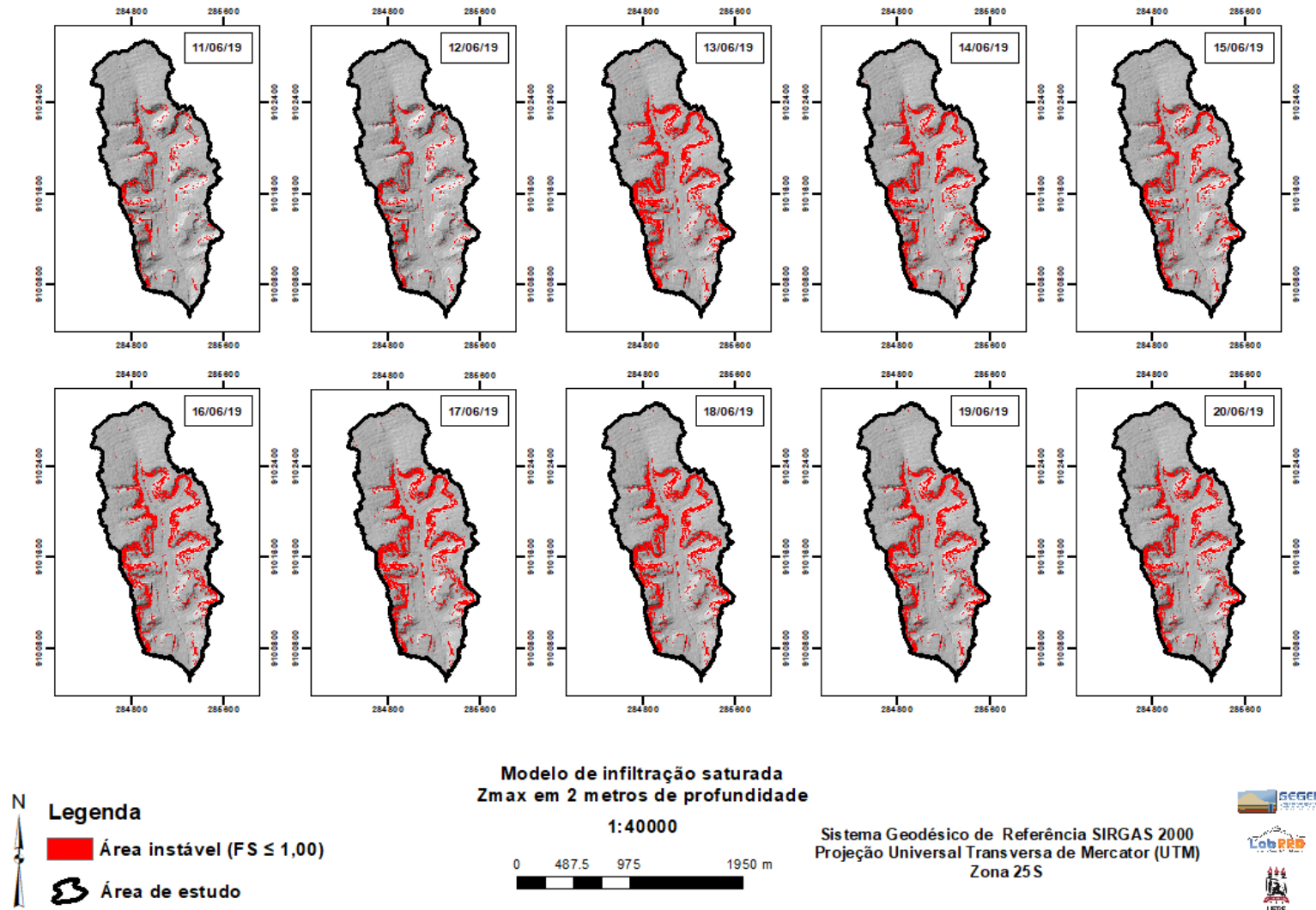
A Figura 132 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da Análise BSAT2. A Tabela 62 apresenta a validação desse mapa por meio do método LR_{class} . A tabela mostra que 15,75% da área foi classificada como instável, abrangendo 84,00% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 74,93%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 74,93% de chance de incluí-lo.

Tabela 62 – Análise BSAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento raso por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
FS $\leq$ 1,00	105	84,00	15,75	5,33	74,93
1,00 < FS $\leq$ 1,25	7	5,60	5,04	1,11	15,61
1,25 < FS $\leq$ 1,50	3	2,40	4,24	0,57	7,96
FS > 1,50	10	8,00	74,97	0,11	1,50
	125 (b)	100,00	100,00	7,12 (f)	100,00

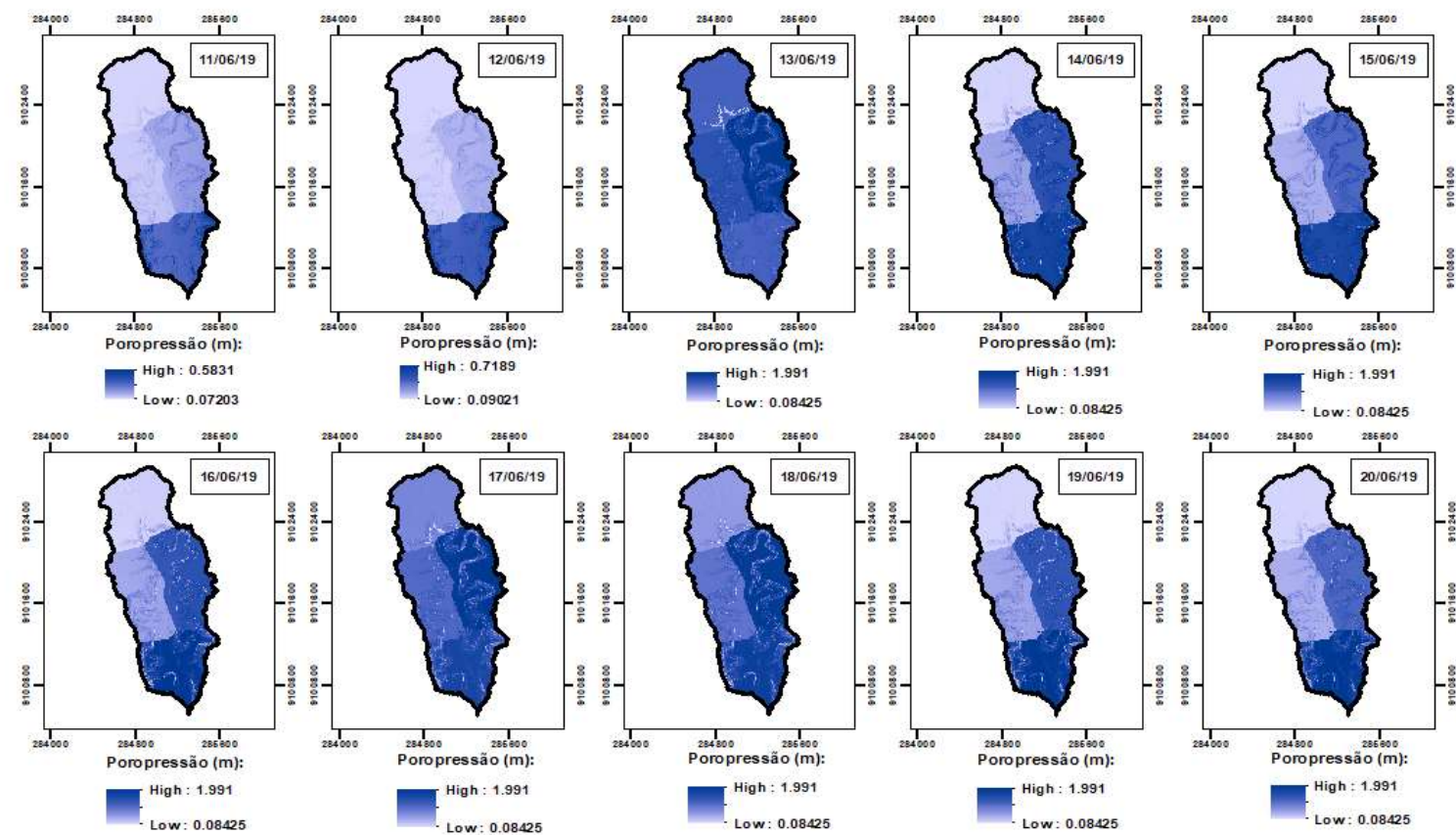
Fonte: O Autor (2022).

Figura 130 – Análise BSAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 131 – Análise BSAT2: Variação da poropressão com a precipitação.



Poropressão na profundidade do FSmin
Modelo de infiltração saturada
Zmax em 2,0 metros de profundidade

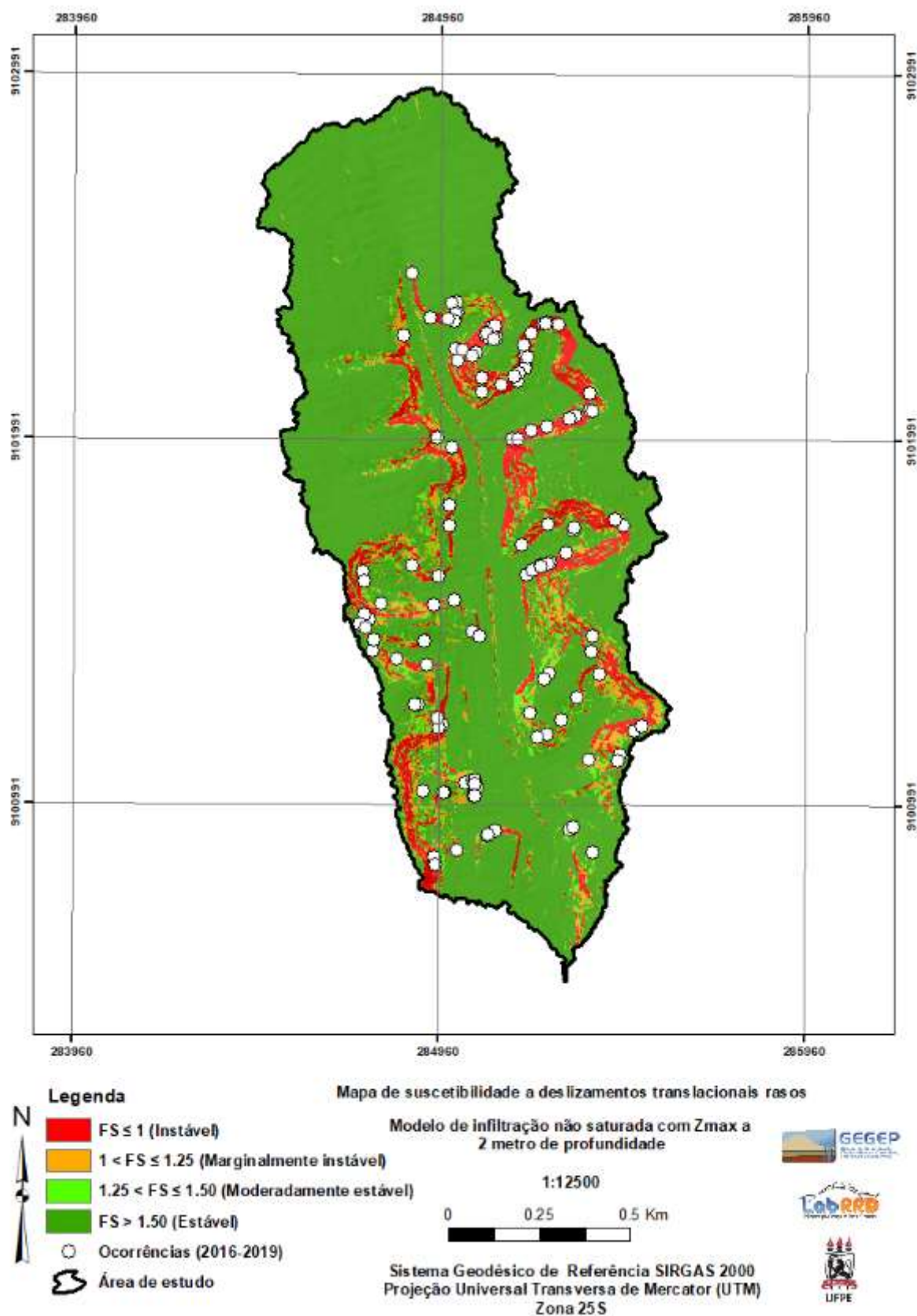
1:50000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



Fonte: O Autor (2022).

Figura 132 – Análise BSAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

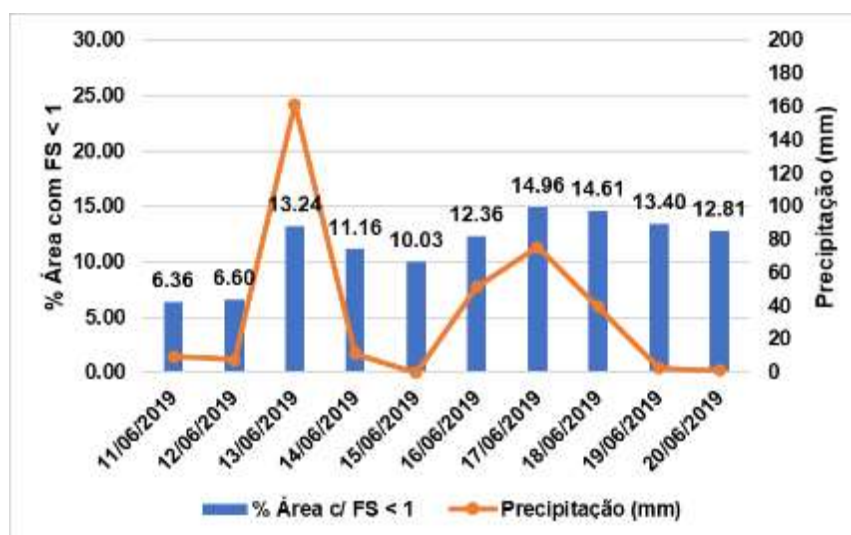


Fonte: O Autor (2022).

7.3.1.1.3 Análise BSAT3

Nessa análise o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,00 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 133 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável varia com precipitação atingindo o maior resultado no dia 17/06/19.

Figura 133 – Análise BSAT3: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 134 apresenta a distribuição espacial da área instável. Os mapas mostram que a área classificada com $FS \leq 1,00$, cresceu consideravelmente no dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, atingindo maior valor no dia 17/06/19, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nos dias subsequentes a área instável variou de acordo com a intensidade da chuva. Para esse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 3 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 135 apresenta a distribuição da poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . A sequência de mapas mostra uma mudança considerável das condições iniciais da poropressão a partir do 13/06/19, alcançado em alguns locais uma pressão hidrostática igual a 2,987 m.

Os valores de poropressão nos dias subsequentes apresentam variação seguindo a intensidade da chuva. Porém, devido cada zona possuir parâmetros hidrológicos distintos, o regime de infiltração das águas da chuva é diferente em cada uma delas, conseqüentemente, a distribuição de poropressão dentro da área varia de maneira não uniforme, explicando, assim, porque a área instável varia ao longo dos dias, mesmo quando o valor da poropressão máxima permanece constante na Figura 135.

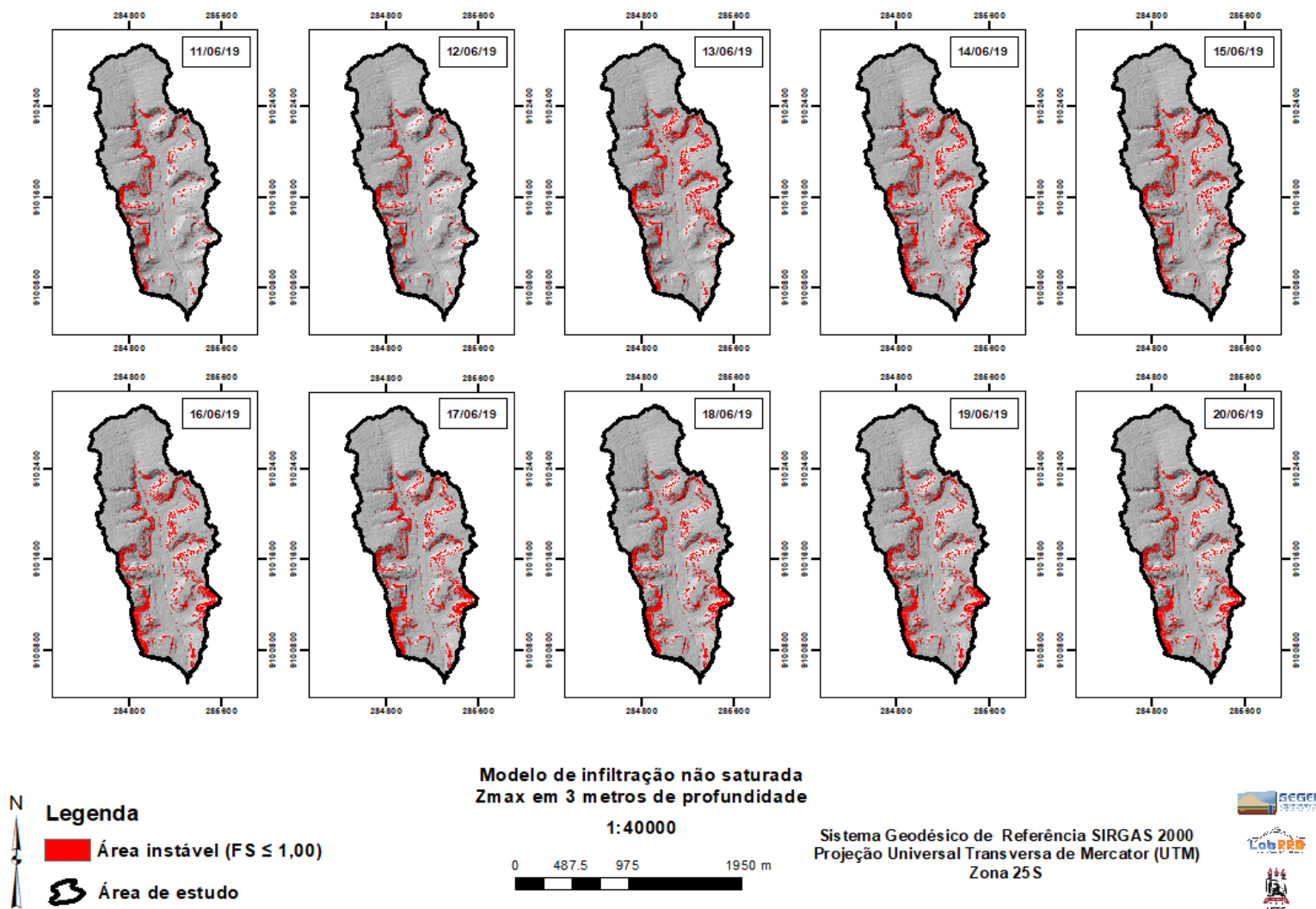
A Figura 136 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da Análise BSAT3. A Tabela 63 apresenta a validação desse mapa por meio do método LR_{class} . Essa tabela mostra que 14,96% da área foi classificada como instável, abrangendo 84,00% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 70,76%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 70,76% de chance de incluí-lo.

Tabela 63 – Análise BSAT3: Validação do mapa de suscetibilidade por meio do método L_R Class.

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
FS $\leq$ 1,00	105	84,00	14,96	5,62	70,76
1,00 < FS $\leq$ 1,25	6	4,80	4,74	1,01	12,76
1,25 < FS $\leq$ 1,50	6	4,80	3,92	1,22	15,42
FS > 1,50	8	6,40	76,38	0,08	1,06
	125 (b)	100,00	100,00	7,94 (f)	100.00

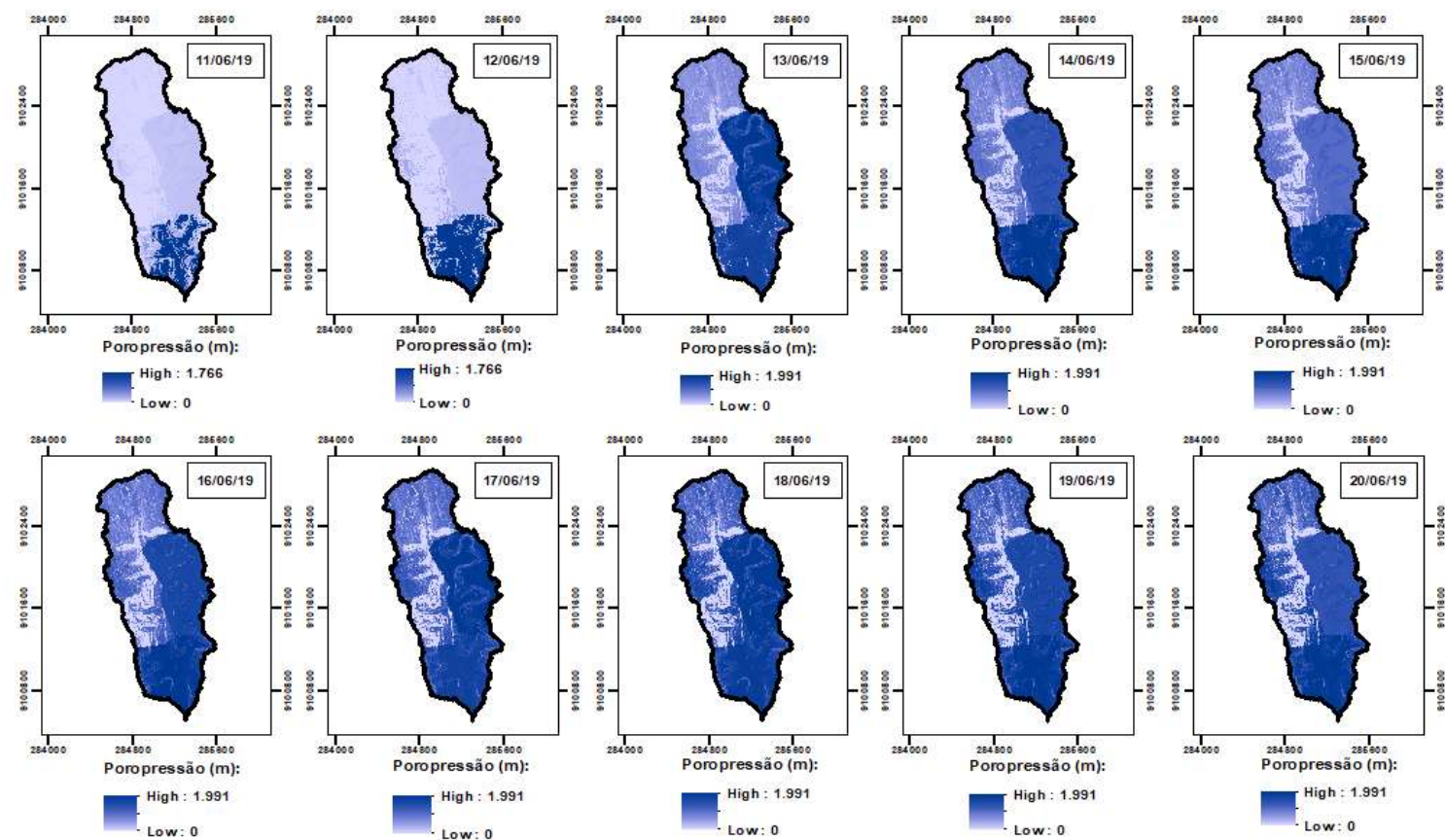
Fonte: O Autor (2022).

Figura 134 – Análise BSAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 135 – Análise BSAT3: Variação da poropressão com a precipitação.



Legenda



Área de estudo

Poropressão na profundidade do FS_{min}
Modelo de infiltração não saturada
Z_{max} em 3 metros de profundidade

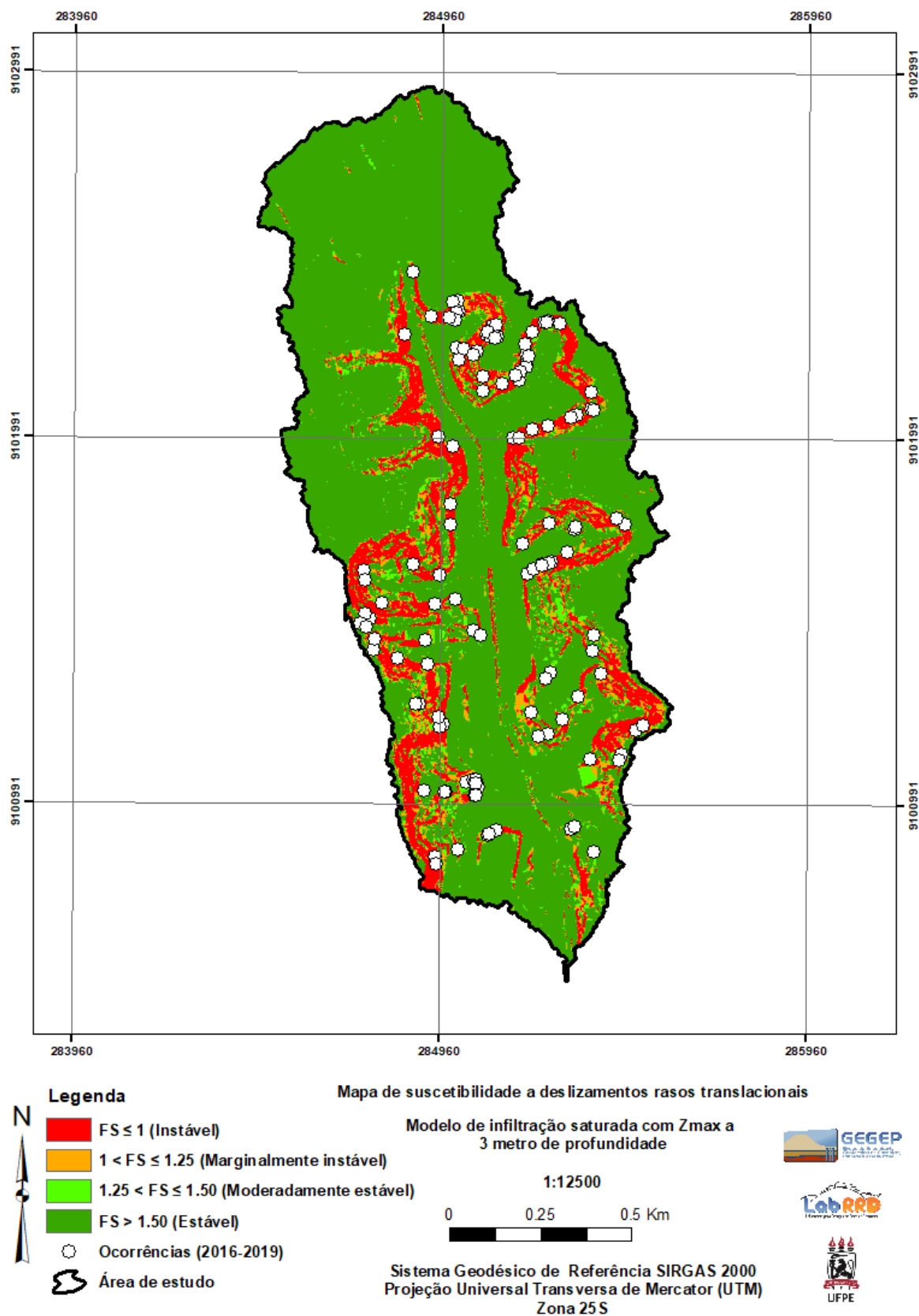
1:50000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



Fonte: O Autor (2022).

Figura 136 – Análise BSAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.



Fonte: O Autor (2022).

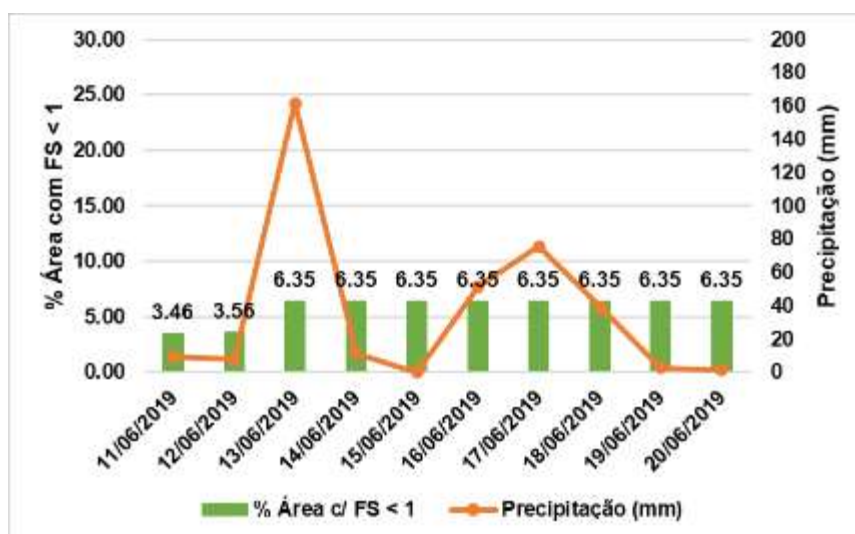
7.3.1.2 Análises NSAT do Cenário B

As análises do tipo NSAT foram realizadas utilizando o modelo de infiltração saturada para três valores de Z_{max} .

7.3.1.2.1 Análise BNSAT1

Nesse cenário o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 1,00 metro de profundidade a partir da superfície. A Figura 137 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável aumentou, atingindo 6,35%, quando a precipitação correspondeu a 161,53mm no dia 13/06/19. A partir desse dia esse percentual de área instável se mantém constante até o último dia analisado (20/06/19).

Figura 137 – Análises BNSAT1: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 138 apresenta a distribuição espacial da % de área instável, essa aumentou consideravelmente no dia 13/06, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nos dias seguintes a área classificada com $FS \leq 1,00$, não apresenta variação. Destaca-se que nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 1,00 metro a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 139 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . Os mapas mostram uma mudança significativa nas condições iniciais de poropressão a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação de

161,53mm. Nesse dia, em algumas localidades, foi registrado um valor de pressão hidrostática correspondente a 0,9971m. Nessa análise mesmo cada zona apresentando parâmetros geotécnicos e hidrológicos diferentes, a distribuição de poropressão não varia no intervalo entre 13/06/19 e 20/06/19 (último dia analisado). Indicando que a chuva precipitada após o dia 13/06/19 conseguiu manter a mesma distribuição de poropressão. Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias explica porque a % porcentagem de área instável aumenta e se mantém constante entre 13/06/19 e 20/06/2019.

A Figura 140 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da análise BNSAT1. O mapa mostra que em algumas localidades, muitas ocorrências não foram previstas pela área instável. Essas ocorrências não previstas pelo modelo estão localizadas na área da Zona 4, que possui a maior coesão entre as quatro zonas de propriedades consideradas, refletindo assim a influência desse parâmetro no cálculo do FS. Segundo Marin, Velasquez e Sánchez (2021), a coesão é o parâmetro que mais afeta a estabilidade.

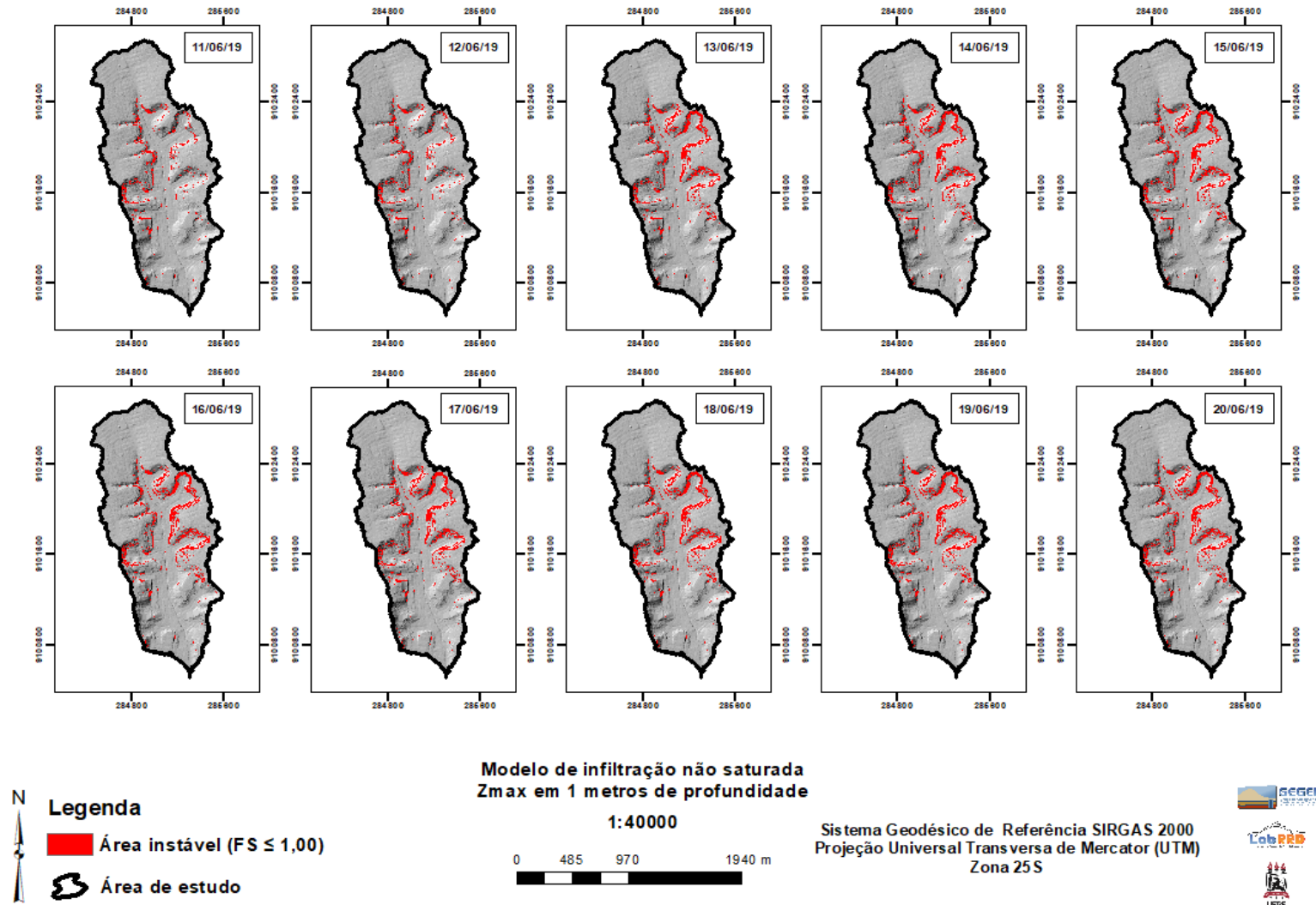
A Tabela 64 apresenta a validação do mapa de suscetibilidade por meio do método LR_{class} . Essa tabela mostra que 6,35% da área foi classificada como instável, abrangendo 58,40% das ocorrências registradas. A $\%LR_{FS \leq 1,00}$ obtida é 62,62%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 62,62% de chance de incluí-lo.

Tabela 64 – Análises BNSAT1: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento rasos por meio do método L_R Class.

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	73	58,40	6,35	9,20	62,62
$1,00 < FS \leq 1,25$	20	16,00	5,18	3,09	21,05
$1,25 < FS \leq 1,50$	13	10,40	4,69	2,22	15,10
$FS > 1,50$	19	15,20	83,79	0,18	1,24
	125 (b)	100,00	100,00	14,69 (f)	100,00

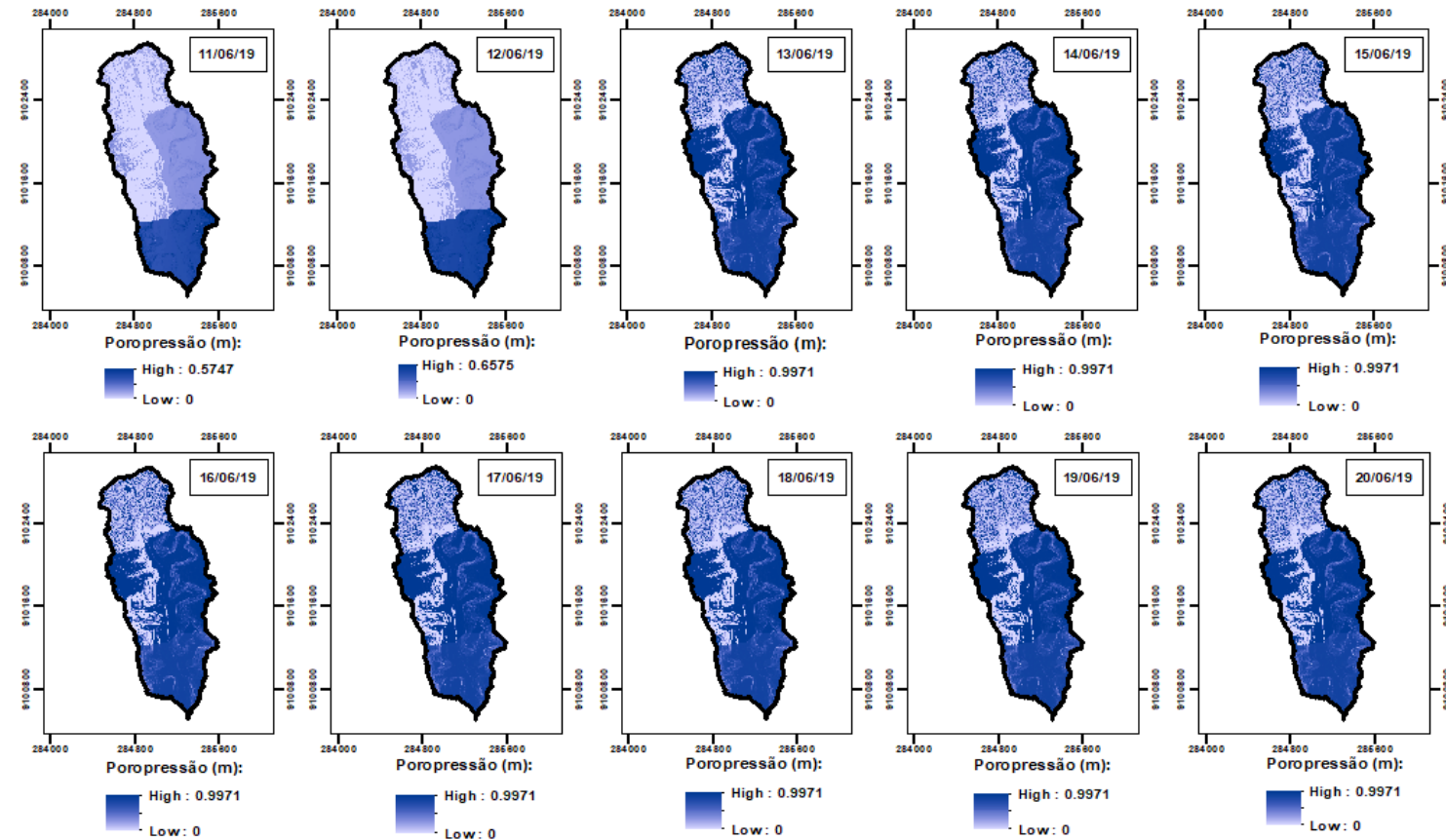
Fonte: O Autor (2022).

Figura 138 – Análises BNSAT1: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 139 – Análises BNSAT1: Variação da poropressão com a precipitação.



Legenda

Área de estudo

Poropressão na profundidade do FSmin
Modelo de infiltração não saturada
Zmax em 1 metro de profundidade

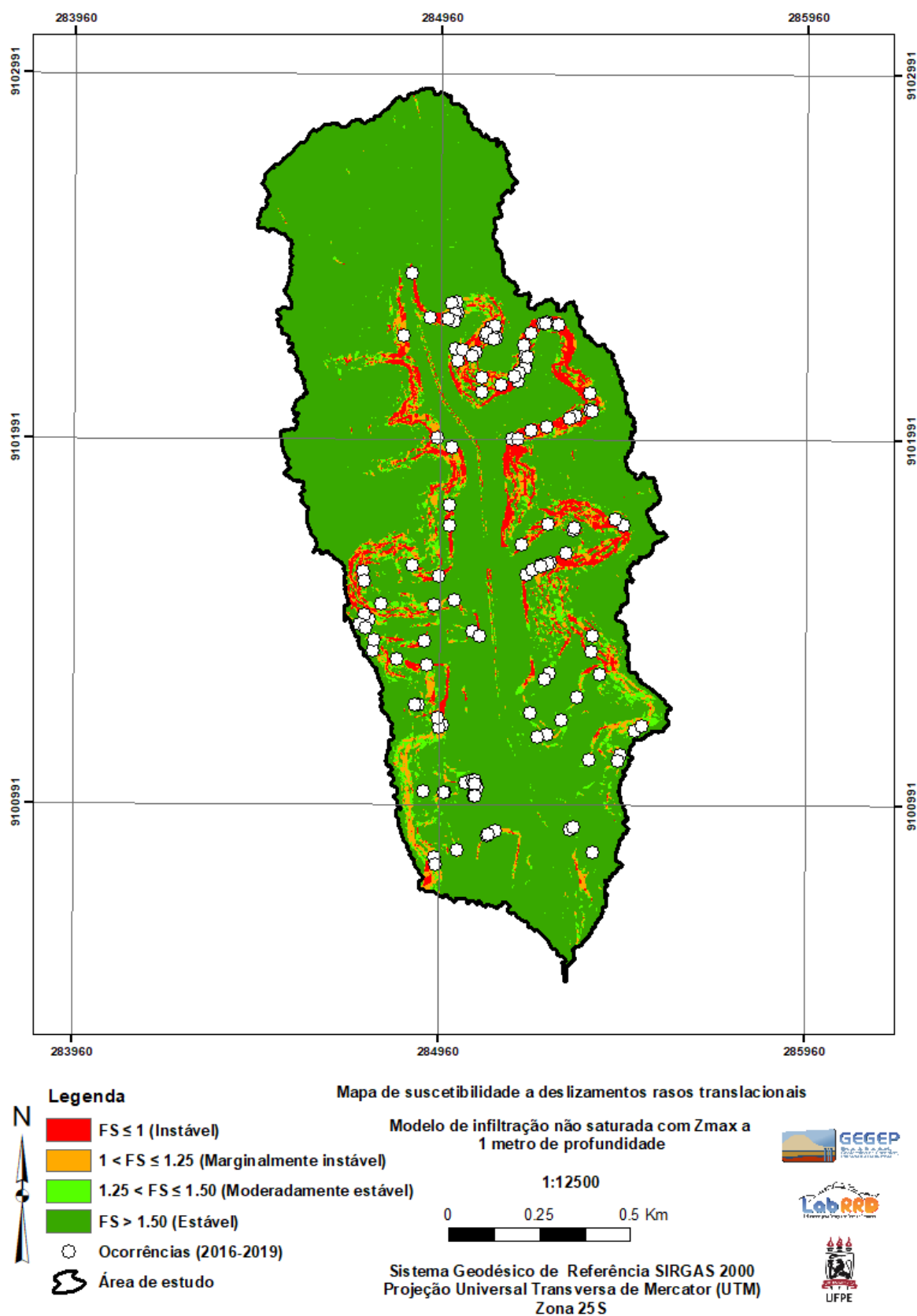
1:50000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



Fonte: O Autor (2022).

Figura 140 – Análise BNSAT1: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

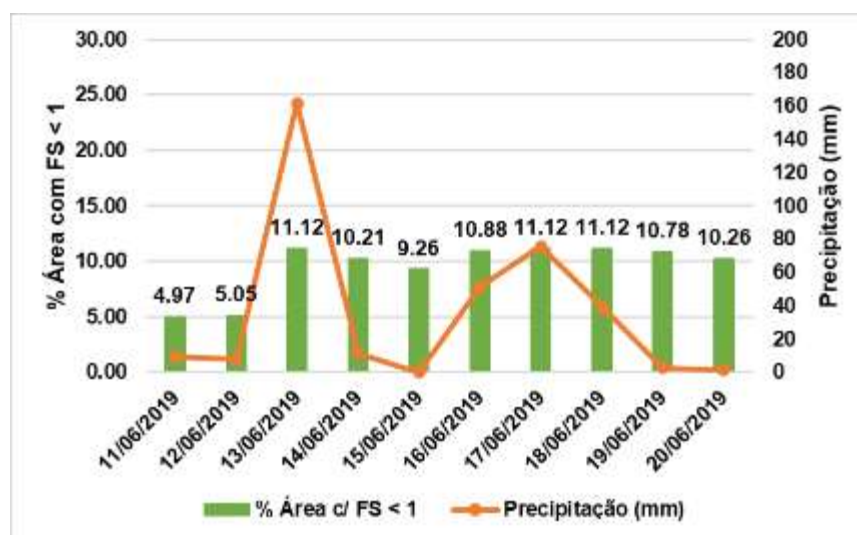


Fonte: O Autor (2022).

7.3.1.2.2 Análise BNSAT2

Na Análise BNSAT2 o Z_{max} e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 2,00 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 141 apresenta a relação entre % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável foi sensível a precipitação variando de acordo com a intensidade da mesma. Alcançando no dia 13/06 um valor referente a 11,12%.

Figura 141 – Análise BNSAT2: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 142 plota a distribuição espacial área instável. Os mapas mostram um aumento considerável da porcentagem de área instável no dia 13/06, devido a precipitação de 161,53mm, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nesse cenário o FS_{min} foi calculado na profundidade de 2 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao Z_{max} .

A Figura 143 apresenta a distribuição da poropressão na profundidade correspondente ao FS_{min} . A sequência de mapas mostra um aumento da pressão hidrostática no dia 13/06/19, devido à chuva. Nesse dia, em algumas localidades, a pressão hidrostática foi igual a 1,991 m. Porém, mesmo cada zona apresentando parâmetros geotécnicos e hidrológicos diferentes, a distribuição de poropressão varia de maneira quase uniforme entre 13/06/19 e 20/06/19 (último dia analisado). Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias explica porque a % porcentagem

de área instável aumenta e se mantém quase constante nesse mesmo intervalo de tempo.

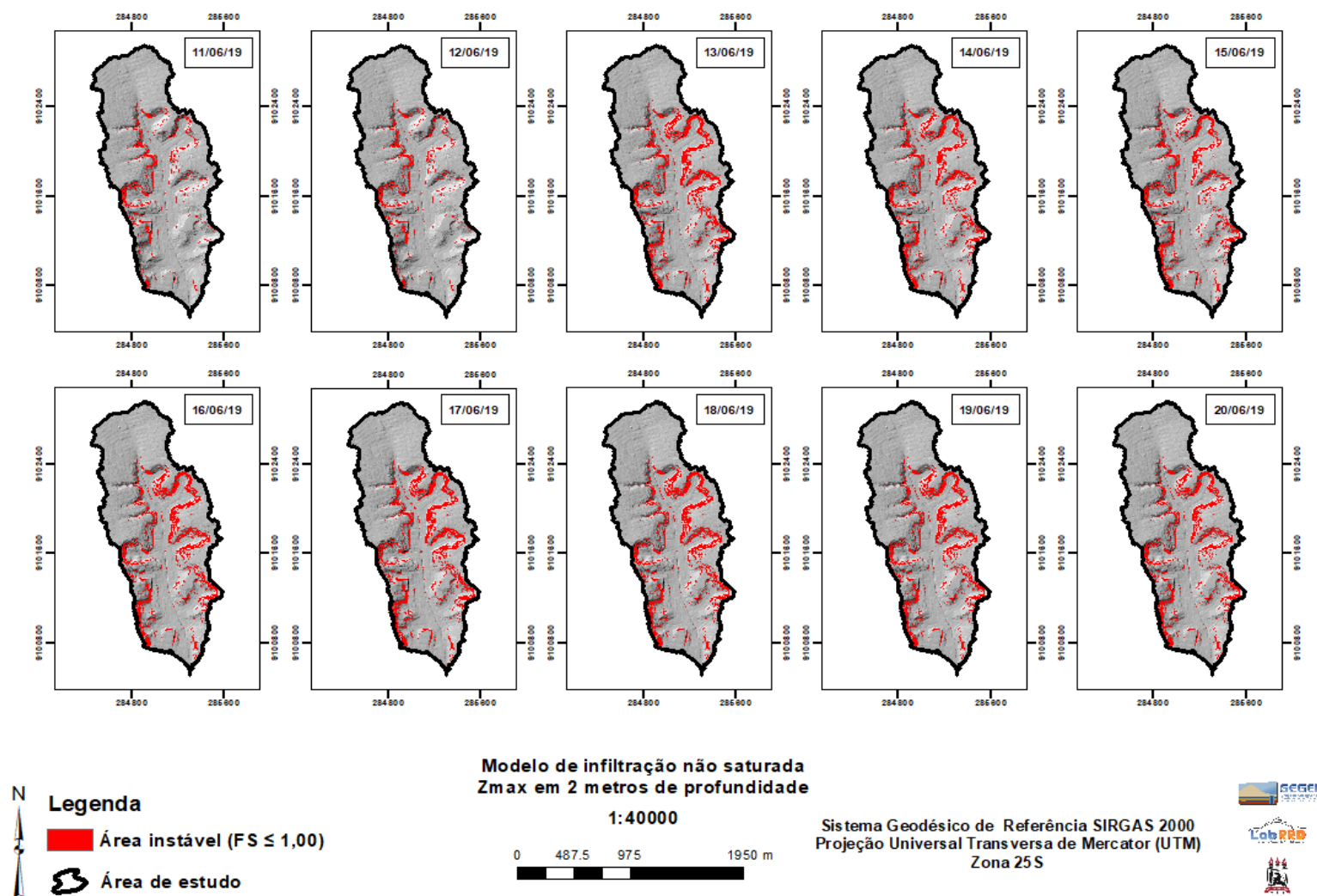
A Figura 144 mostra o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais da Análise BNSAT2. O mapa mostra que existe concordância entre os locais de ocorrência e a classe referente ao $FS \leq 1,00$. A Tabela 65 apresenta a validação desse mapa de suscetibilidade por meio do método LR_{class} . Através dela constata-se que 11,12% da área foi classificada como instável, abrangendo 81,60% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 78,47%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 78,47% de chance de incluí-lo.

Tabela 65 – Análise BNSAT2: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento $c=a/b$	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} $e=c/d$	% LR_{class} $=e/f$
$FS \leq 1,00$	102	81,60	11,12	7,34	78,47
$1,00 < FS \leq 1,25$	5	4,00	5,78	0,69	7,39
$1,25 < FS \leq 1,50$	7	5,60	4,63	1,21	12,93
$FS > 1,50$	11	8,80	78,47	0,11	1,20
	125 (b)	100,00	100,00	9,36 (f)	100,00

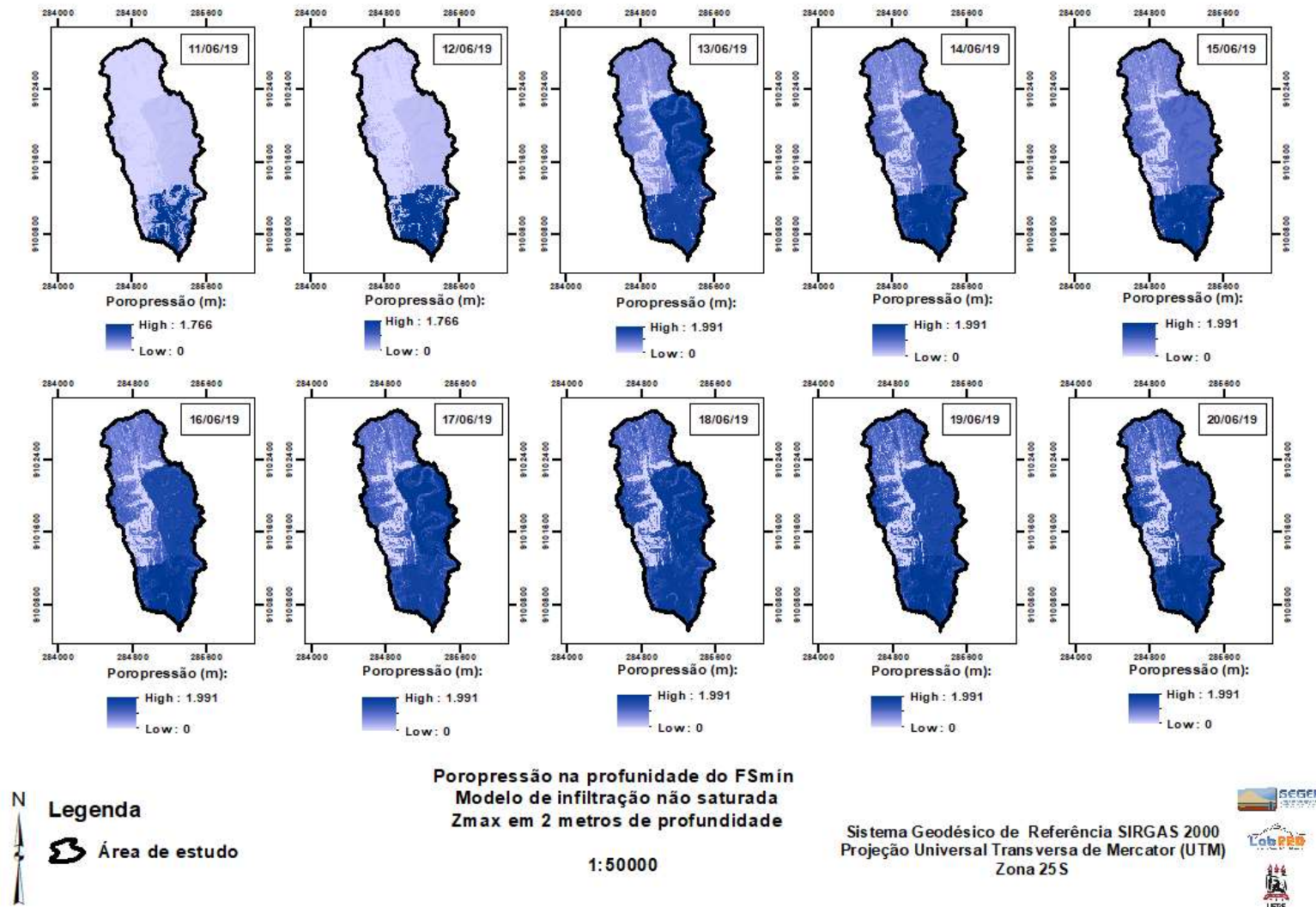
Fonte: O Autor (2022).

Figura 142 – Análise BNSAT2: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



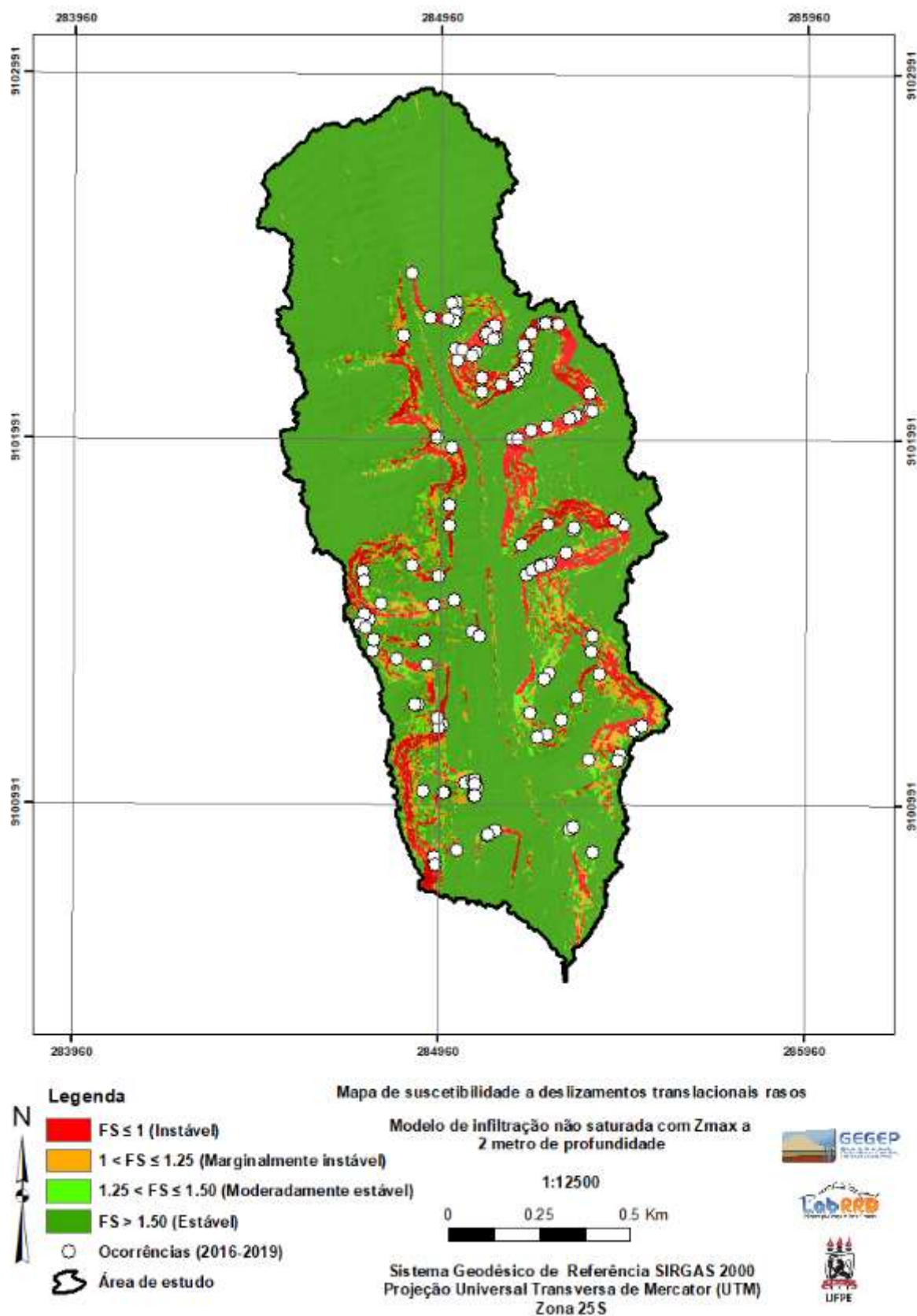
Fonte: O Autor (2022).

Figura 143 – Análise BNSAT2: Variação da poropressão com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 144 – Análise BNSAT2: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

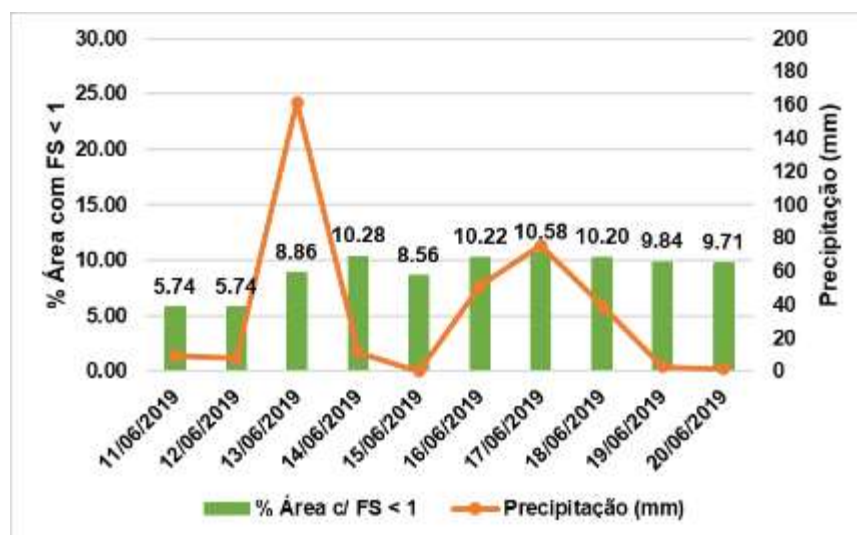


Fonte: O Autor (2022).

7.3.1.2.3 Análise BNSAT3

Na Análise BNSAT3 o $Z_{\max}$ e o nível de água são considerados constantes para toda área de estudo e estão localizados a 3,0 metros de profundidade a partir da superfície. A Figura 145 apresenta a relação entre a % de área instável (classificada com $FS \leq 1,00$) em relação a área total considerada e a precipitação. O gráfico mostra que a % de área instável varia com precipitação atingindo o maior resultado no dia 17/06/19.

Figura 145 – Análise BNSAT3: Relação entre a % de área instável e a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

A Figura 146 apresenta a distribuição espacial da área instável para todos os dias analisados. A sequência de mapas mostra que as áreas classificadas com $FS \leq 1,00$, aumentou a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação de 161,53mm, alcançando o maior resultado em 17/06/19, sendo esse o primeiro dia mais crítico. Nesse cenário o $FS_{\min}$ foi calculado na profundidade de 3 metros a partir da superfície, coincidindo com a profundidade atribuída ao $Z_{\max}$.

A Figura 147 apresenta a distribuição de poropressão na profundidade correspondente ao $FS_{\min}$. A sequência de mapas mostra o aumento da poropressão a partir do dia 13/06/19, devido a precipitação, atingindo em alguns locais uma pressão hidrostática de valor igual a 1,991 m. Nessa análise mesmo cada zona apresentando parâmetros geotécnicos e hidrológicos diferentes, a distribuição de poropressão varia de maneira quase uniforme entre 13/06/19 e 20/06/19 (último dia analisado). Esse comportamento da poropressão ao longo dos dias explica porque a % porcentagem de área instável aumenta e se mantém quase constante nesse mesmo intervalo.

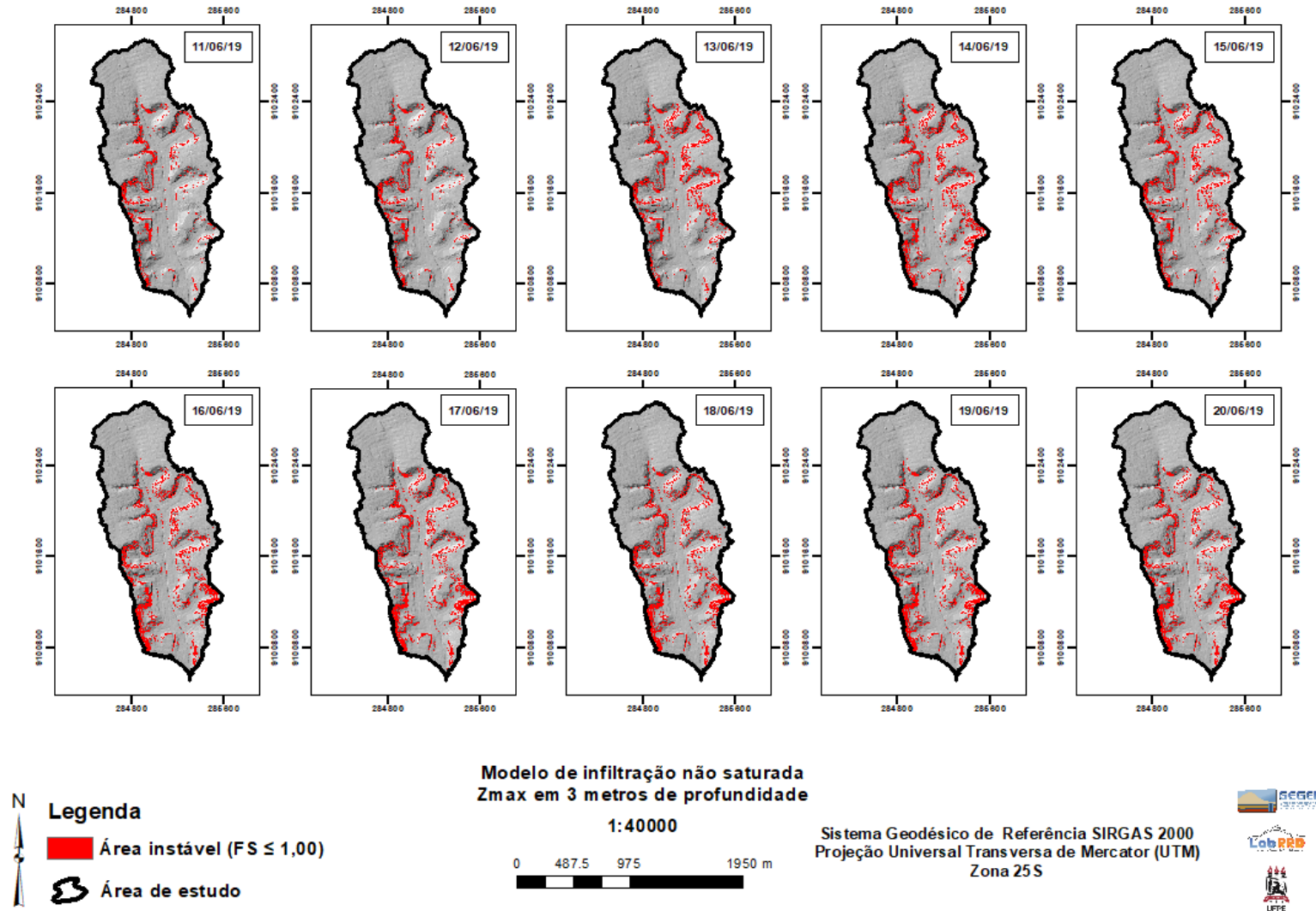
A Figura 148 apresenta o mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacional da Análise BNSAT3. A Tabela 66 apresenta a validação do dia mais crítico por meio do método LR_{class} . A tabela mostra que 10,58% da área foi classificada como instável pelo modelo, abrangendo 61,60% das ocorrências registradas. Desse modo, a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ é 56,11%. Isso significa que se ocorrer um deslizamento a área classificada como instável possui 56,11% de chance de incluí-lo.

Tabela 66 – Análise BNSAT3: Validação do mapa de suscetibilidade a deslizamento rasos por meio do método LR_{Class} .

Classes de FS	Pontos de deslizamento (a)	% de pontos de deslizamento (c)=a/b	% área prevista pelo TRIGRS (d)	LR_{class} (e)=c/d	% LR_{class} =e/f
$FS \leq 1,00$	77	61,60	10,58	5,82	56,11
$1,00 < FS \leq 1,25$	26	20,80	7,17	2,90	27,97
$1,25 < FS \leq 1,50$	11	8,80	5,73	1,54	14,80
$FS > 1,50$	11	8,80	76,52	0,12	1,11
	125 (b)	100,00	100,00	10,37 (f)	100,00

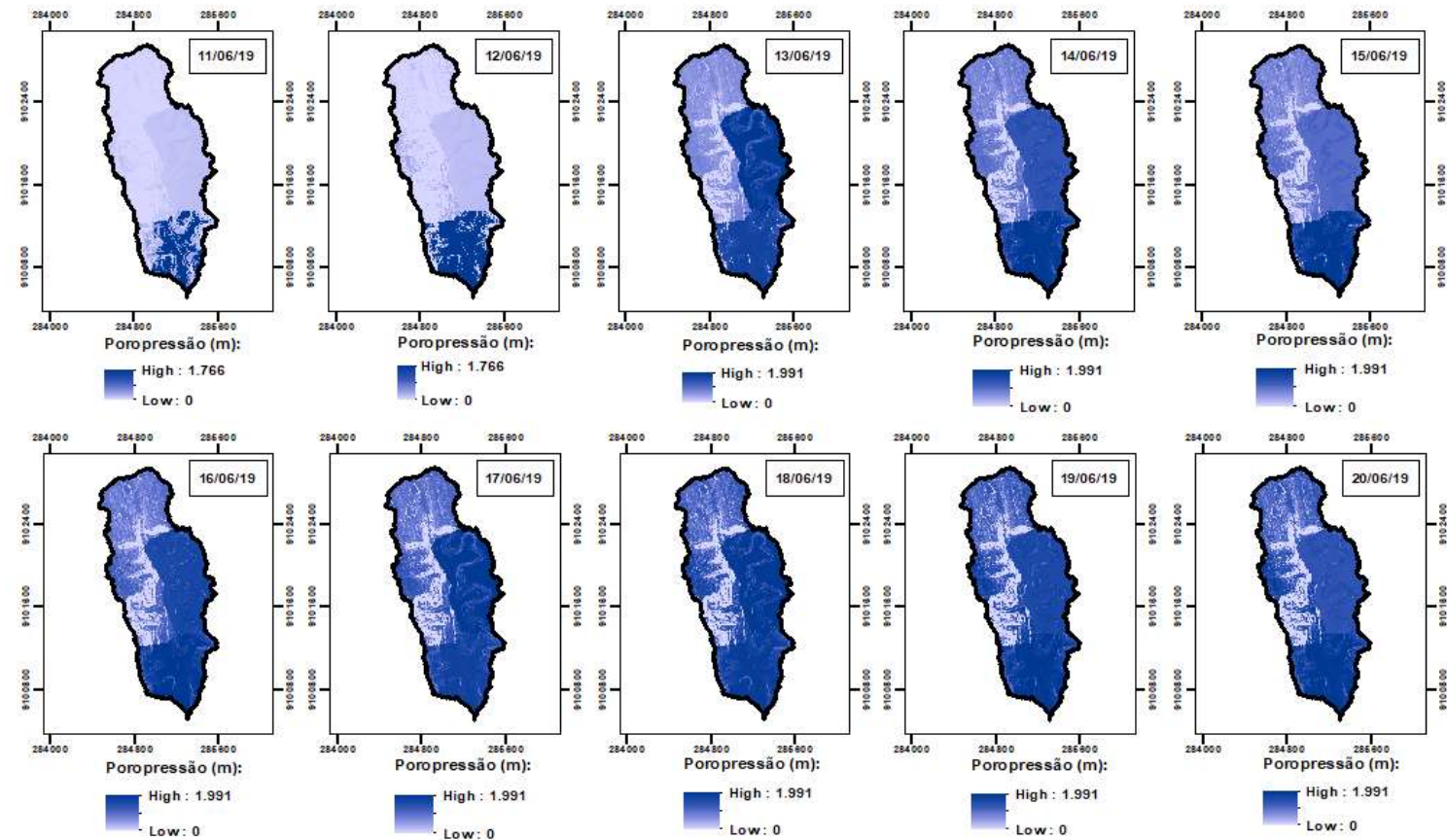
Fonte: O Autor (2022).

Figura 146 – Análise BNSAT3: Variação da área instável ($FS \leq 1,00$) com a precipitação.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 147 – Análise BNSAT3: Variação da poropressão com a precipitação.



Poropressão na profundidade do FSmin
Modelo de infiltração não saturada
Zmax em 3 metros de profundidade

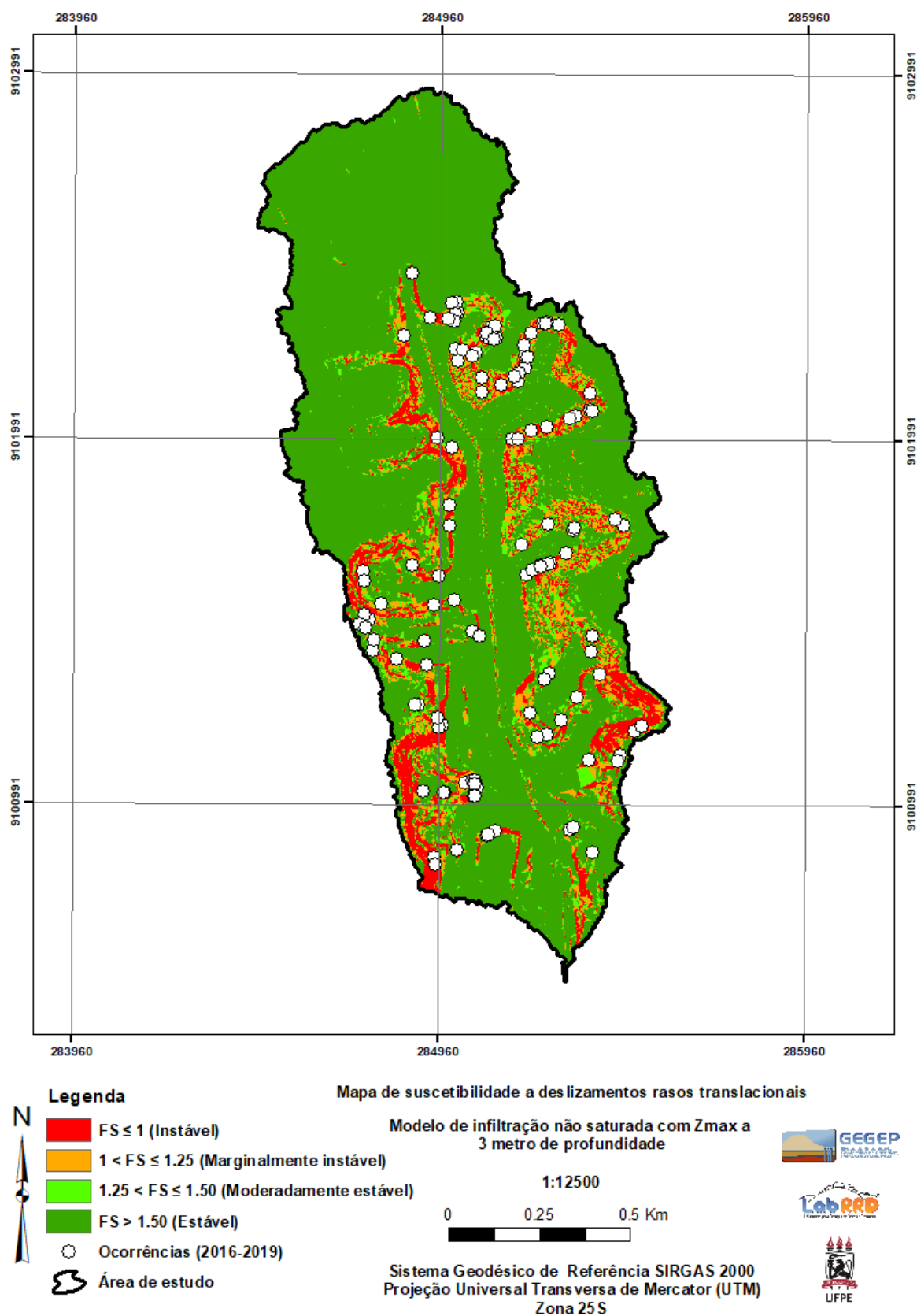
1:50000

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Zona 25 S



Fonte: O Autor (2022).

Figura 148 – Análise BNSAT3: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais.

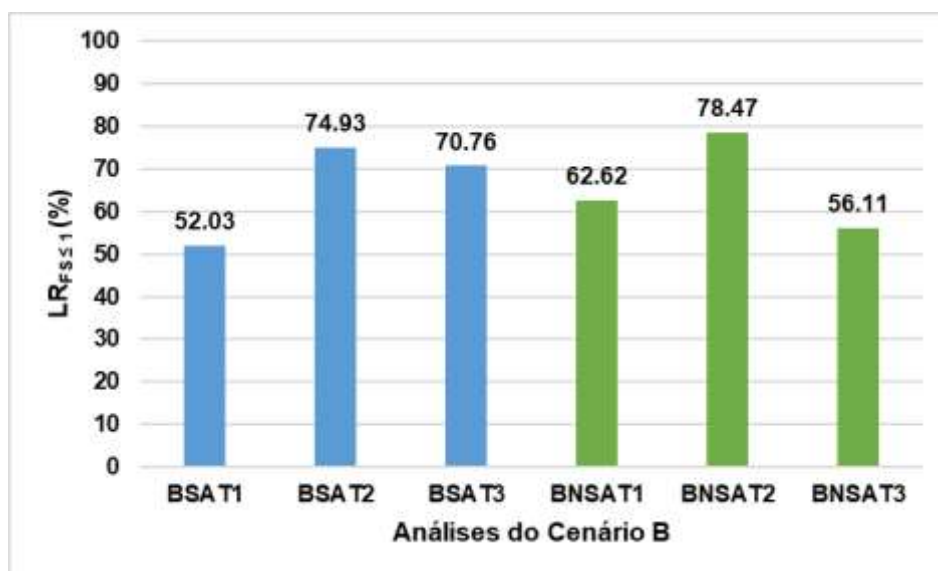


Fonte: O Autor (2022).

7.3.1.3 Comparação dos resultados do Cenário B

A Figura 149 apresenta a comparação da $\%LR_{FS \leq 1,00}$ das análises do Cenário B. O gráfico mostra que as análises SAT e NSAT realizadas com $Z_{max} = 2,00 \text{ m}$ apresentaram $\%LR_{FS \leq 1,00} \geq 70\%$, desse modo, são classificadas como um bom resultado de acordo com o Park, Nikhil e Lee (2013). Devido a melhor ponderação entre a % de área instável e o número de acertos dos pontos de deslizamento a análise BNSAT2 é a mais precisa do Cenário B, apresentando $\%LR_{FS \leq 1,00} = 78,47\%$.

Figura 149 – Comparação da $\%LR_{FS \leq 1}$ para as análises do Cenário B.



Fonte: O Autor (2022).

Como visto nas análises do Cenário A, as áreas classificadas como instáveis pelo modelo coincidiram com àquelas que apresentam as encostas mais elevadas e íngremes na região em estudo, com inclinações que superam os 27° . Esses resultados concordam com o observado por Fernandes et al. (2001); Guimarães et al. (2003); Salciarini et al. (2006); Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010); Listo e Vieira (2012); Michel et al. (2014) e Vieira et al. (2018) que afirmam que há influência da topografia sobre os resultados de modelos que combinam modelos hidrológicos e de estabilidade. Nas pesquisas que utilizaram o TRIGRS, os autores verificaram que a área prevista como instável é extremamente dependente da inclinação e elevação da área considerada, devido aos efeitos da topografia no cálculo do Fator de Segurança (FS).

O Cenário B apresentou uma % de área instável menor em relação ao Cenário A. Considerando as maiores % de área instável de ambos os cenários, o Cenário A

apresentou uma % de área instável equivalente a 18,30% nas análises ASAT2 e ANSAT2; o Cenário B apresentou uma % de área instável equivalente a 15,75% na análise BSAT2, indicando uma redução de aproximadamente 17%. Essa redução reflete o efeito da variação dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos dentro da área considerada. Salciarini et al. (2006) verifica resultado semelhante ao comparar as análises considerando os parâmetros constantes e especializados através de zonas. Os autores constataam que as análises considerando os parâmetros constantes superestimam a área instável em relação as análises realizadas considerando zonas de propriedades.

Ademais, o efeito dos parâmetros de resistência é mais evidente no Cenário B, especificadamente nas análises BSAT1 e BNSAT1, que devido a maior coesão da Zona 4, não conseguem prever as ocorrências localizadas nessa área quando o $Z_{max} = 1,00\text{ m}$. O efeito da coesão no cálculo do fator de segurança é também verificado por Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010), Listo e Vieira (2015) e König, Kux e Mendes (2019). Segundo Marin, Velasquez e Sánchez (2021), no modelo TRIGRS a coesão é o parâmetro que mais afeta a estabilidade. Nas análises seguintes o aumento do Z_{max} reduz a contribuição da coesão na resistência ao cisalhamento.

No que se refere a distribuição de poropressão, devido a variação dos parâmetros hidrológicos a infiltração da água da chuva ocorre de maneira diferente para cada uma das zonas. Em razão disso, o desenvolvimento da poropressão também ocorre de maneira distinta em cada uma das zonas consideradas. Porém, nas análises do tipo NSAT a distribuição de poropressão na área considerada ocorreu de maneira mais uniforme, devido a atenuação da infiltração causado pela camada não saturada. Nas análises do tipo SAT a variação dos parâmetros hidrológicos acentuou as diferenças na distribuição da poropressão em cada zona, consequentemente a variação da poropressão ocorre de maneira menos uniforme. Devido a isso a % de área instável tende a apresentar maior variação nas análises do tipo SAT, enquanto que a % de área instável tende a ser mais constante nas análises do tipo NSAT.

Entretanto, na análise BNSAT3 a influência da camada não saturada na infiltração não se mostrou a favor da segurança, visto que a atenuação da infiltração reduziu os valores de poropressão, diminuindo, por consequência a % de área

instável. A redução da área instável, diminuiu o número de acertos dos pontos de deslizamento, apresentando $\%LR_{FS \leq 1,00} = 56,11\%$. Esse resultado reforça que o modelo é sensível as condições iniciais, exigindo um bom conhecimento dos parâmetros de resistência; da profundidade máxima do solo (Z_{max}) e do nível de água inicial para não gerar resultados não representativos de acordo com o esclarecido por Baum, Savage e Godt (2009).

Por via de regra, esses resultados se apresentaram dentro do previsto por Baum, Godt e Savage (2010). Esses constataram que nas análises realizadas considerando a condição inicial saturada a poropressão positiva se desenvolve mais cedo, gerando resultados mais conservadores. Por outro lado, os resultados das análises realizadas considerando a condição inicial não saturada são afetados pelo efeito da sucção na camada não saturada que atenua e atrasa a resposta da poropressão induzida pela chuva. Desse modo, para esse cenário, conclui-se que quanto maior o Z_{max} e a profundidade inicial do nível de água, consequentemente maior será o efeito da camada não saturada na infiltração da água da chuva.

Do mesmo modo que o visto no Cenário A, a % de área instável inicial, nos dias de baixa precipitação, tende a crescer à medida que se aumenta a profundidade Z_{max} . Segundo Baum, Godt e Savage (2010), a profundidade do solo afeta a resistência ao cisalhamento, reduzindo a contribuição do ângulo de atrito e da coesão a medida o que Z_{max} aumenta. Adicionalmente a % de área instável inicial também pode ser explicada pela interferência antrópica como a presença de cortes realizadas sem critério técnico, além da impossibilidade de incorporar no modelo a existência de estruturas de contenção e outras intervenções de cunho antrópico presentes na área de estudo.

7.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Esse capítulo visou apresentar os resultados das análises de suscetibilidade a deslizamentos rasos geradas por meio do modelo TRIGRS. O modelo TRIGRS permite avaliar a previsibilidade espaço-temporal de eventos de deslizamento de modo regional. Os principais resultados desse modelo é o cálculo da poropressão transiente e do fator de segurança em diferentes etapas de tempo do evento pluviométrico considerado.

Para a realização das análises de suscetibilidade utilizando o TRIGRS, foram elaborados dois cenários, denominados A e B. No cenário A, foram realizadas análises de suscetibilidade considerando a área de estudo completa, além dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos constantes para toda a bacia. No cenário B é considerado apenas uma parcela da área de estudo, especificadamente o local com maior concentração de pesquisas, devido a isso, os parâmetros utilizados são especializados por meio de zona de propriedades físicas.

Os resultados das análises realizadas com o TRIGRS mostraram que os resultados são satisfatórios e coerentes e permitiram identificar as áreas mais susceptíveis a deslizamentos rasos translacionais em decorrência dos acréscimos de poropressão causado pela elevação do índice pluviométrico. De maneira geral, os resultados apresentaram comportamento semelhante ao previsto pela literatura, entre eles: a influência das feições mais elevadas e íngremes na distribuição da área classificada como instável; sensibilidade às condições iniciais como os parâmetros de resistência, a profundidade do Z_{max} e do nível de água inicial; a maior precisão do modelo de infiltração inicial não saturada e etc. Portanto, conclui-se que o TRIGRS é uma ferramenta importante para prever deslizamentos de terra induzidos pela chuva, capaz de identificar áreas mais susceptíveis a deslizamentos.

8 CONCLUSÕES

A suscetibilidade indica a potencialidade de desenvolvimento de um fenômeno ou um processo do meio físico, sejam eles naturais ou induzidos em uma determinada área (BRASIL, 2007; BITAR, 2014). Em virtude da importância social e científica da determinação da suscetibilidade a um fenômeno natural ou induzido pela influência antrópica, essa dissertação foi desenvolvida com o intuito de realizar análises de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais em uma bacia hidrográfica localizada dentro da RMR, que abrange áreas dos municípios do Recife-PE e Jaboatão dos Guararapes-PE. Utilizando para isso o modelo TRIGRS que é essencialmente quantitativos e sustentados por leis físicas.

Considerando os objetivos deste trabalho, neste capítulo serão descritas as conclusões alcançadas para cada um deles. Em seguida, serão apresentadas sugestões para pesquisas relacionadas a análise de suscetibilidade a deslizamentos rasos translacionais utilizando modelos TRIGRS.

As principais conclusões obtidas da caracterização geotécnica dos solos da área de estudo de forma espacial foram:

- Amostras coletadas por meio dos ensaios do trado manual, foram submetidas a análises táteis-visuais que classificaram o substrato investigado como pertencente à Formação Barreiras, constituído por sedimentos areno-siltico-argilosos, de canal fluvial, típicos de depósitos por enxurradas.
- O perfil determinado por meio de sondagem do tipo SPT apresentou concordância com os perfis investigados por Meira (2008) e Santos (2018), disponíveis no Anexo A. Entre as características que corrobora com a concordância entre os perfis estão: i) perfil predominantemente arenoso; ii) camadas superficiais (entre 0 e 5 metros) com baixa resistência a penetração (N_{SPT} variando entre 1 e 5); e iii) aumento do N_{SPT} com a profundidade.
- A condutividade hidráulica, determinada por meio do Permeâmetro de Guelph, apresentou ordem de grandeza de 10^{-7} m/s. Os resultados se mostraram dentro da faixa de valores esperados para solos da Formação Barreiras, ou seja, variando entre 10^{-5} a 10^{-7} m/s, conforme o apontado por Coutinho e Severo (2009).

- Os ensaios de granulometria e limites de Atterberg, mostraram que os solos analisados no atual estudo, bem como em estudos anteriores realizados dentro da área de interesse, são definidos como areias argilosas ou areias argilosas e siltosas de acordo com a classificação unificada (SUCS). Apresentam plasticidade variando de baixa a média e similaridade entre os percentuais granulométricos.
- O resultado do ensaio edométrico classificou o solo como condicionado ao colapso, sendo similar aos resultados encontrados nos estudos realizados por Lafayette (2006), Meira (2008) e Santos (2018).
- O resultado do ensaio de cisalhamento direto, apresentou concordância com a faixa de valores apresentados na literatura. Porém, os parâmetros de resistência aqui determinados foram mais próximos aos resultados obtidos por Meira (2008).
- As curvas características determinadas apresentam comportamento típico de solos arenosos e formato bimodal. Curvas características com esse formato foram encontrados na RMR em outros trabalhos realizados dentro e fora da área de estudo, exemplo: Lafayette (2006), Santana (2006), Silva (2007), Meira (2008), Magalhães (2013), Santos (2018) e Ramos (2019).
- Os gráficos gerados por meio dos dados coletados pelas PCDs Geotécnicas instaladas na área de estudo, mostraram que os sensores conseguiram registrar a variação da umidade do solo em decorrência da chuva.
- Os perfis de umidade traçado com esses dados mostraram que a maior variação de umidade dos pontos prospectados ocorre entre 1.5-2.0 metros de profundidade. Porém, nas camadas mais profundas, ou seja, entre 2.0-3.0 metros de profundidade a variação de umidade é menos acentuada.

As principais conclusões obtidas do registro dos deslizamentos no intervalo entre 2014 e 2020 foram:

- A atual área de estudo possui um vasto histórico de deslizamento que geralmente estão associados a perdas econômicas e humanas.
- Na área de estudo as imagens dos deslizamentos atuais e as cicatrizes de deslizamentos antigos, mostram que estes possuem as características de deslizamentos rasos translacionais, concordando com Gusmão Filho (1997),

que observou que na RMR a maioria dos deslizamentos são rasos translacionais.

- O levantamento das ocorrências de deslizamentos mostrou que o período com maior número de registro está concentrado no período entre março e julho, coincidindo com o período mais chuvoso da área da área de estudo. Esse fato reforça a relação entre as ocorrências de deslizamentos com os eventos pluviométricos.
- Os dados analisados mostram que o número médio de ocorrências anual, dentro do intervalo tempo analisado, corresponde a 96 deslizamentos por ano.
- O mapeamento das ocorrências mostrou que existe uma tendência a ocorrência de deslizamentos nos mesmos locais ou em regiões muito próximas ano após ano, indicando assim os locais mais suscetíveis a deslizamentos da área de estudo.

As principais conclusões obtidas nas análises de suscetibilidades realizadas por meio do modelo TRIGRS foram:

- O TRIGRS gerou resultados satisfatórios e coerentes, permitindo identificar as áreas mais susceptíveis a deslizamentos rasos translacionais.
- Em cada análise realizada a área classificada como instável aumentou em decorrência dos acréscimos de poropressão causado pela elevação do índice pluviométrico, possibilitando avaliar a influência das chuvas no cálculo do Fator de Segurança.
- Nos cenários A e B a área classificada como instável coincidiu com as feições mais elevadas e íngremes da região em estudo. Esses resultados concordam com o observado por Vieira, Fernandes e Augusto Filho (2010) e Listo (2015), que afirmam que há influência da topografia sobre a área prevista como instável pelo modelo.
- As análises utilizando o modelo de infiltração inicial não saturada gerou resultados mais precisos que o modelo de infiltração inicial saturada. Esse efeito é mais nítido nas análises do Cenário B, pois devido aos efeitos da camada não saturada, a distribuição de poropressão varia de maneira mais uniforme, consequentemente, a % de área instável tende a variar de maneira mais constante.

- No Cenário A e B, quanto maior o Z_{max} e a profundidade inicial do nível de água, maior foi o efeito da sucção na camada não saturada, atenuando e atrasando a resposta da poropressão induzida pela chuva e consequentemente o momento de ruptura das encostas, explicando as diferentes datas de previsão do dia mais crítico entre as análises do tipo SAT e NSAT.
- Devido aos efeitos da camada não saturada e a melhor ponderação entre a % de área instável e o número de acertos dos pontos de deslizamento a análise ANSAT3 é a mais precisa do Cenário A, apresentando $\%LR_{FS \leq 1,00} = 81,23\%$. Do mesmo modo, a análise BNSAT2 é a mais precisa do Cenário B, apresentando $\%LR_{FS \leq 1,00} = 78,47\%$.
- Na análise BNSAT3 a influência da camada não saturada na infiltração não se mostrou a favor da segurança, reforçando a importância de um bom conhecimento dos parâmetros de entrada do modelo (parâmetros geotécnicos; hidrológicos; a profundidade do Z_{max} e do nível de água inicial) para não gerar resultados pouco representativos de acordo com o esclarecido por Baum, Savage e Godt (2009).
- Nas análises do Cenário B foi observado uma % de área instável menor em relação ao Cenário A. Considerando os maiores percentuais de área instável de ambos os cenários foi observado uma redução de aproximadamente 17%. Essa redução reflete o efeito da variação dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos dentro da área de estudo.
- O efeito dos parâmetros de resistência é mais evidente no Cenário B, especificadamente nas análises BSAT1 e BNSAT1, que devido a maior coesão da Zona 4, não consegue prever as ocorrências localizadas nessa região. Segundo Marin, Velasquez e Sánchez (2021), no modelo TRIGRS a coesão é o parâmetro que mais afeta a estabilidade. Nas análises seguintes o aumento do Z_{max} reduz as contribuições da coesão na resistência ao cisalhamento.
- Em ambos os cenários algumas nuances da interferência antrópica como cortes realizados sem critérios técnicos ou a presença de obras de contenção não incorporadas no modelo, gerou uma % de área instável inicial que tende a crescer à medida que se aumenta a profundidade Z_{max} .

As principais conclusões obtidas da validação dos mapas de suscetibilidade gerados pelo TRIGRS por meio do método LR_{class} foram:

- O método LR_{class} demonstrou que o modelo apresentou resultados consistentes com as observações reais, indicando que as análises ANSAT3 ($\%LR_{FS \leq 1} = 81,23\%$) e BNSAT2 ($\%LR_{FS \leq 1} = 78,47\%$) foram as mais precisas, devido a boa relação entre a % de área instável e o número de acertos dos pontos de deslizamento.
- A validação também mostrou que a $\%LR_{FS \leq 1,00}$ apresentou resultados dentro do intervalo dos valores encontrados em outras pesquisas realizadas com o modelo TRIGRS como Park, Nikhil e Lee (2013) que obteve $\%LR_{FS \leq 1,00} = 70,30\%$; Viet et al. (2017) que obteve $\%LR_{FS \leq 1,00} = 75,87\%$; Tran et al. (2017) que atingiu $\%LR_{FS \leq 1,00} = 64,18\%$ e Marin, Velasquez e Sánchez (2021) que alcançou $\%LR_{FS \leq 1,00} = 97,47\%$.

As sugestões para pesquisas futuras são:

- Buscar alternativas que permitam implementar no TRIGRS a influência da intervenção antrópica nas áreas analisadas, como a consideração do lançamento de águas servidas, obras de contenção, adição de sobrecargas sobre o solo e os efeitos da ocupação desordenada.
- Implementar soluções para considerar o efeito das curvas características bimodais e outras características dos solos tropicais brasileiros nas análises realizadas pelo modelo.
- Analisar estatisticamente a influência dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos sobre a % de área instável.
- Analisar estatisticamente a influência das condições de contorno iniciais como a profundidade do Z_{max} e do nível inicial de água sobre a % de área instável.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR. 11682. **Estabilidade de encostas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT, NBR. 12007. **Solo - Ensaio de adensamento unidimensional**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1990.
- ABNT, NBR. 13602. Solo — **Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo — Ensaio de dispersão SCS**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT, NBR. 16097. **Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT, NBR. 6484. **Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT, NBR. 9603. **Sondagem a trado – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT, NBR. 9604. **Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.
- ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. **Slope stability and stabilization**. New York: A Wiley-Interscience Publication, 2002.
- AGUIAR, A. B. **O emprego do Permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. Orientador: Cláudio Fernando Mahler. 2001. 90 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- ALBUQUERQUE, K. C. 'Assim que ela botou o rosto na janela, já foi a barreira caindo em cima dela'; mulher fica parcialmente soterrada durante deslizamento de barreira no Recife. **TV Jornal**, Recife, p. 01-17, 14 maio 2021. Disponível em: <https://tvjornal.ne10.uol.com.br/bronca-24-horas/2021/05/14/assim-que-ela-botou-o-rosto-na-janela-ja-foi-a-barreira-caindo-em-cima-dela-mulher-fica-parcialmente-soterrada-durante-deslizamento-de-barreira-no-recife-209339>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- ALHEIROS, M. M.; FERREIRA, M. G. V. X. **A sub-bacia Cabo**. In: **Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte**. Recife: UFPE. 1991.
- ALHEIROS, M. M.; SOUZA, M. A. A.; BITOUN, J.; MEDEIROS, S. M. G. M.; AMORIM JÚNIOR, W. M. **Manual de ocupação dos morros da região metropolitana do Recife. Programa Viva o Morro**. 1. ed. FIDEM, Recife, 360p, 2003.

ALHEIROS, M.M.; LIMA FILHO, M.F.; MONTEIRO, F.A.J.; OLIVEIRA FILHO, J.S. Sistemas Depositionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. Soc. Bras. Geol., **Anais XXXV Congr.**, Belém, n. 2, p. 753-760, 1988.

ALMEIDA, G. H. T. D.; MASINI, L. S.; MALTA, L. R. S. **Hidrologia e drenagem**. 1. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 200 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D 5126. **Standard Guide for Comparison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in Vadose Zone**. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D3080. **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D5298. **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D6836. **Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge**. 2016.

AN, K.; KIM, S.; CHAE, T.; PARK, D. Developing an accessible landslide susceptibility model using open-source resources. **Sustainability**, v. 10, n. 2, 2018.

ARAÚJO, R. C. **Estudo da erodibilidade de solos da Formação Barreiras**. Orientador: Franklin dos Santos Antunes. 2000. 168 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

ARCGIS. *In: Create Thiessen Polygons*. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/create-thiessen-polygons.htm>. Acesso em: 10 dez. 2021.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, v. 2. p. 721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C.; DILÁSCIO, M. V. Estabilização de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (ed.). **Geologia de engenharia e ambiental**. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, cap. 19, p. 400-420.

ÁVILA, F. F.; ALVALÁ, R. C.; MENDES, R. M.; AMORE, D. J. (2020). The influence of land use/land cover variability and rainfall intensity in triggering landslides: a back-analysis study via physically based models. **Natural Hazards**, v. 105, p. 1139–1161, 2021.

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na região metropolitana do Recife**. 2010. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 340p.

BANDEIRA, A. P. N.; COUTINHO, R. Q. Critical Rainfall Parameters: Proposed Landslide Warning System for the Metropolitan Region of Recife, PE, Brazil. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 1, n. 38, p. 27-48, 2015.

BAUM, R. L.; GODT, J. W.; SAVAGE, W. Z. Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2009. 75 p.

BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. **TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis**. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424, 2002. 35 p.

BEMIS, S.; MICKLETHWAITE, S.; TURNER, D.; JAMES, M.; AKCIZ, S.; THIELE, S.; BANGASH, H. Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. **J. Struct. Geol.**, v. 69, p. 163–178, 2014.

BITAR, O. Y. (coord.). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000**: nota técnica explicativa. São Paulo: Publicação IPT, 2014.

BJERRUM, L.; KRINGSTAD, S.; KUMMENEJE, O. The Shear Strength of a Fine Sand. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5., 1961, Paris. **Proceedings** [...]. Paris: [s. n.], 1961. p. 29-37.

BLIGHT, G. E. **Unsaturated soil mechanics in geotechnical practice**. 1. ed. South Africa: Taylor & Francis Group, 2013.

BRASIL. **Guia Prático de Utilização de Alertas do Governo Federal para Ações de Preparação para Desastres**. 2. ed. Brasília: Ministério do Desenvolvimento.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 11 abr. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 19 jan. 2022.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007. 176 p.

BRIAUD, J.-L. **Introduction to geotechnical engineering**: unsaturated and saturated soils. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

BROMHEAD, E. N. **The Stability of Slopes**. 2. ed. New York: Spon Press, 1992. 424 p.

BUDHU, M. **Soil mechanics and foundations**. 3. ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

CAMARGO, D. C.; TENDERO, J. I. C.; ÁLVAREZ, J. F. O.; SEVILLA, F. M. Calibração da sonda de capacitância Enviroscan. **Irriga**, Botucatu, p. 27 - 39, 2012.

CAMPOS, T. M. P. Equipamentos e técnicas para determinação da sucção no campo. **Anais II Simp. Solos não Saturados**, Recife-PE, p. 9-8, 1994.

CANIL, K.; FREITAS, C. G. L.; SOBREIRA, F. G.; COLLARES, E. G. Cartografia geotécnica e geoambiental. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (ed.). **Geologia de Engenharia e Ambiental**. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, cap. 20, p. 422-437.

CARVALHO, P. A. S. (coord.). **Manual de geotecnia: taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas**. São Paulo: Publicação IPT, 1991.

CENDRERO, A.; DRAMIS, F. The contribution of landslides to landscape evolution in Europe. **Geomorphology**, v. 15, p. 191-211, 1996.

CHANDLER, R.J.; CRILLEY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low rise buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, p. 82-89, 1992.

CHENG, Y. M.; LAU, C. K. **Slope stability analysis and stabilization: New methods and insight**. 2. ed. [S. l.]: CRC Press, 2014.

CHUVA causa mortes, deslizamento de barreiras e alagamentos no Grande Recife. **G1 Pernambuco**, Recife. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2019/07/24/chuva-causa-deslizamento-de-barreiras-e-alagamento-no-grande-recife.ghtml>. Acesso em: 19 jan. 2022.

CHUVAS fortes derrubam parte de pista no Ibura. **TV Jornal**, Recife, 13 jun. 2019. Disponível em: <https://tvjornal.ne10.uol.com.br/por-dentro/2019/06/13/chuvas-fortes-derrubam-parte-de-pista-no-ibura-171217>. Acesso em: 19 jan. 2022.

CISLAGHI, A.; RIGON, E.; LENZI, M. A.; BISCHETTI, G. B. A probabilistic multidimensional approach to quantify large wood recruitment from hillslopes in mountainous-forested catchments. **Geomorphology**, v. 306, p. 108-127, 2018.

COUTINHO, R. Q.; BANDEIRA, A. P. N. Processos de instabilização de encostas e avaliação do grau de Risco: estudo de caso nas cidades de Recife e Camaragibe. **Desastres naturais: suscetibilidade e risco, mitigação e prevenção, gestão e ações emergenciais**. Rio de Janeiro: COPPEIUFRJ, 2012.

COUTINHO, R. Q.; HENRIQUE, H. M.; NETO, D.P.S; CAVALCANTI, M. M. **Mapeamento de áreas de risco de deslizamento na comunidade lagoa**

encantada, Recife-PE. In: VII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Florianópolis, Santa Catarina, 2017.

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Conferencia Investigación Geotécnica Para Projeto de Estabilidade de Encostas. In: **5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, COBRAE**, São Paulo. 2009. p. 55.

COUTINHO, R. Q.; SILVA, M. M. **Mecânica dos solos 2: Estabilidade de Taludes.** Recife: UFPE, 2005.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (ed.). **Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report.** Washington, D.C.: National Academy Press, 1996, p. 36–75.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 562 p.

DELATIM, I. J.; OLIVEIRA, E.; MONTICELI, J. J.; VAZ, L. F. (coord.). **Manual de sondagem.** 5. ed. São Paulo: ABGE, 2013.

DESCASO com Barreira no Ibura. **TV Guararapes Oficial**, Recife, p. 01-17, 16 out. 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zniEIY5NT5l>. Acesso em: 19 jan. 2022.

DESLIZAMENTO de barreira destrói casa no Pantanal Ibura. Recife, 17 jul. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ee5oqhyMbCQ>. Acesso em: 19 jan. 2022.

DIAS, H. C.; HÖLBLING, D.; GROHMANN, C. H. Landslide Susceptibility Mapping in Brazil: A Review. **Geosciences**, n. 11, 2021.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strength and Slope Stability.** 2. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2014.

DYMINSKI, A. S. **Notas de Aula: Estabilidade de Taludes.** Curitiba: [s. n.], 2000. 29 p. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/taludes-6/4889991/>. Acesso em: 19 mar. 2020.

ELOARZA, M. G. **Geomorfología.** 1. ed. Madrid: Pearson Educación, 2008. 920 p.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. **Groundwater Monitoring Review**, v. 9, p. 184-193, 1989.

EPOCH. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community. **EUR 15805 EN**, v. 1, 1993.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, p. 861–874, 2005.

FERNANDES, M. T. **Avaliação das técnicas de laboratório e campo para realização de ensaios de permeabilidade de solos**. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. 2017. 138 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

FERNANDES, N.E.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, F. A. T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FERREIRA, S. R. M.; OLIVEIRA, J. T. R.; GONZÁLEZ, Y. V. Técnicas de amostragem e preparação de amostras. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. cap. 7, p. 145-179.

FIGUEIREDO, R. B. **Engenharia social: soluções para áreas de risco**. São Paulo: Makron Books, 1994. 252p.

FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 320 p.

FORMETTA, G.; RAGO, V.; CAPPARELLI, G.; RIGON, R.; MUTO, F.; VERSACE, P. Integrated Physically based system for modeling landslide susceptibility. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 9, p. 74-82, 2014.

FORNASARI FILHO, N.; FARIA, M. S. C. Relevo e dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (ed.). **Geologia de engenharia e ambiental**. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, cap. 11, p. 204-228.

FORTES, R. M.; FERREIRA, R. C. Solos em engenharia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (ed.). **Geologia de engenharia e ambiental**. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, cap. 4, p. 54-69.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variable for unsaturated soils. **Journal Geotechnical Div.**, n. 103, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. [s. l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2012.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soilwater characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533-546, 1994.

FUNDAJ (FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO). **Mapa de Exclusão/Inclusão Socioambiental do Recife**. FUNDAJ: Recife, 2007.

GARCÍA-ARISTIZÁBAL, E. F.; ARISTIZÁBAL, E.; MARÍN, R. J.; MARTÍNEZ, J. C. G. Implementación del modelo TRIGRS con análisis de confiabilidad para la evaluación

de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia. **Tecnológicas**, v. 22, n. 4, p. 111-129, 2019.

GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v. 85, p. 228–232, 1958.

GEO-RIO. **Manual Técnica de Encostas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação GEO-RIO, 2014. v. 1.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 186 p.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GIRÃO, O. **Análise de processos erosivos em encostas na zona sudoeste da cidade do Recife – Pernambuco**. Orientador: Antonio José Teixeira Guerra. 2007. 305 f. Tese (Doutor em Geografia) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209–212, 2004.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209–212, 2004.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: CARVALHO, J. C.; CARVALHO, J. C.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. cap. 9, p. 205-229.

GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (SHALSTAB) em diferentes escalas cartográficas. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 1, p. 85-97, 2005.

GOUDIE, A. S. (ed.). **Encyclopedia of Geomorphology**. 1. ed. Londres: Routledge, 2004. v. 1. 1156 p.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Parameterization 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.

GUSMÃO FILHO, J. A experiência em encostas ocupadas do Recife: integração técnica, institucional e comunitária. **Revista do Instituto Geológico**, v. 16, p. 9-22, 1995.

GUSMÃO FILHO, J.A.; FERREIRA, S.R.M.; AMORIM JR, W.M. **Escorregamentos em Morros Urbanos do recife: O caso do Boleiro**. In: Panamerican Symposium on Landslides, II, 1997, Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro: ABMS, 1997. p.985-994.

HEAD, K. H.; EPPS, R. J. **Manual of soil laboratory testing**. 3. ed. London:

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook**: A guide to understanding landslides. Reston, Virginia, U.S.: Geological Survey Circular, 2008. 129 p.

HO, D. Y. F.; FREDLUND, D. G. Increase in shear strength due to soil suction for two Hong Kong soils. **Proceedings of Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils**, Honolulu, p. 263–295, 1982a.

HU, H.; FERNANDEZ-STEEGER, T.M.; DONG, M.; AZZAM, R. Numerical modeling of LiDAR-based geological model for landslide analysis. **Automation in Construction**, v. 24, p. 184-193, 2012.

HUNGR, O.; LEROUÉIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, p. 167-194, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). Coordenação de Geografia. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 91 p.

IBGE (Rio de Janeiro). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Assessoria técnica para a estabilização de encostas, recuperação da infra-estrutura urbana e reurbanização das áreas de risco atingidas por escorregamentos na área urbana do município de Campos do Jordão, SP. **Relatório Técnico 64**. 399, São Paulo, 2002.

International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission. Suggested nomenclature for landslides. Bull. Int. **Assoc. Eng. Geol.**, n. 41, p. 13–16, 1990.

International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission. Suggested nomenclature for landslides. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, n. 41, p. 13–16, 1990.

International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI). A suggested method for describing the activity of a landslide. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, n. 47, p. 53–57, 1993a.

International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI). **A multi-lingual landslide glossary**. Vancouver: Bitech Publishers, 1993b.

IVERSON, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1897–1910, 2000.

JENNINGS, J.E.; KNIGHT, K. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to a collapse of grain structure. In: REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1975, Durban. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 1975. p. 99-105.

KALINSKI, M. E. **Soil mechanics lab manual**. 2. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

KIM, D.; IM, S.; LEE, C.; WOO, C. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed. **Ecological Engineering**, v. 61, p. 658–668, 2013.

KIM, D.; IM, S.; LEE, S. H.; HONG, Y.; CHA, K. Predicting the Rainfall-Triggered Landslides in a Forested Mountain Region Using TRIGRS Model. **Journal of Mountain Science**, n. 7, p. 83-91, 2010.

KÖNIG, T.; KUX, H. J. H.; MENDES, R. M. Shalstab mathematical model and WorldView-2 satellite images to identification of landslide-susceptible areas. **Natural Hazards**, v. 97, p. 1127–1149, 2019.

LACERDA, W. A. The behavior of colluvial slopes in a tropical environment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 9., 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings** [...]. Rio de Janeiro: [s. n.], 2004. p. 1315-1342.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho. 2006. 358 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2006.

LI, X.; LI, J. H.; ZHANG, L. M. Predicting bimodal soil–water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters. **Computers and Geotechnics**, v. 57, p. 85-96, 2014.

LI, Y.; MO, P. A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. **Geomorphology**, n. 340, p. 67–83, 2019.

LIMA, A. F. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da Formação Barreiras na área urbana da cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2002.

LISTO F. L. R.; VIEIRA, B. C. Mapping of Risk and Susceptibility of Shallow-Landslide in the City of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169-170, p. 30-44, 2012.

LISTO, F. L. R. **Propriedades geotécnicas dos solos e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos**. Orientador: Profa. Dra. Bianca

Carvalho Vieira. 2015. 167 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Influência de parâmetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos utilizando o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.16, p. 485-500, 2015.

LU, N.; GODT, J. W. **Hillslope Hydrology and Stability**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2013. 458 p.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

LUTENEGGER, A. J.; SABER, R. T. Determination of collapse potential of soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 11, n. 3, p. 173-178, 1988.

MAGALHÃES, J. S. L. A. **Estudo de estabilidade da Encosta Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe - PE**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho. 2013. 105 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2013.

MARIN, R. J.; GARCÍA, E. F.; ARISTIZÁBAL, E. Assessing the Effectiveness of TRIGRS for Predicting Unstable Areas in a Tropical Mountain Basin (Colombian Andes). **Geotech Geol Eng**, v. 39, p. 2329–2346, 2020.

MARIN, R. J.; VELASQUEZ, M. F.; SÁNCHEZ, O. Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, 2021.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: CARVALHO, J. C.; CARVALHO, J. C.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. cap. 10, p. 231-256.

MASSAD, F. **Obras de terra**: curso básico de geotecnia - com exercícios resolvidos. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MEIRA, F. F. D. A. **Estudo do Processo Erosivo em Encostas Ocupadas**. 2008. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; GRAMINHA, C. A.; PRIETO, C. C.; ÁVILA, F. F.; CAMARINHA, P. I. M. Stability Analysis on Urban Slopes: Case Study of an Anthropogenic-Induced Landslide in São José dos Campos, Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 36, p. 599–610, 2018.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; TOMASELLA, J.; MORAES, M. A. E.; SCOFIELD, G. B. Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000.

Natural Hazards and Earth System Sciences, n. 18, p. 15–30, 2017. DOI <https://doi.org/10.5194/nhess-18-15-2018>, 2018. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/18/15/2018/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MICHEL, G. B.; KOBIYAMA, N. I.; GOERL, R. F. Comparative Analysis of SHALSTAB and SINMAP for Landslide Susceptibility Mapping in the Cunha River Basin, Southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v.14, p. 1266–1277, 2014.

MIZUTORI, M.; GUHA-SAPIR, D. **Economic losses, poverty and disasters 1998–2017**. [S. l.]: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017.

MONCADA, M. P. H. **Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de soluto associadas à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico**. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MONCKS, P. C. S. **RealSense**: uma abordagem explorando aprendizado de máquina no monitoramento de temperatura e umidade em sistemas de compostagem. Orientador: Prof. Dr. Felipe de Souza Marques. 2020. 80 f. Dissertação (Mestre em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

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

MONTRASIO, L.; VALENTINO, R.; LOSI, G. L. Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 11, p. 1927–1947, 2011.

MORACI, N.; CIURLEO, M.; MANDAGLIO, M. C. The use of a physically based model for susceptibility assessment of debris flow source areas. In: GEOTECHNICAL ENGINEERING FOUNDATION OF THE FUTURE, 17., 2019, Reykjavik Iceland. **Proceedings of the XVII ECSMGE-2019** [...]. [S. l.]: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019.

MORADORES denunciam risco de deslizamento de barreira no Ibura. 25 set. 2014. Disponível em: <https://tvuol.uol.com.br/video/moradores-denunciam-risco-de-deslizamento-de-barreira-no-ibura-0402CC1C3962C4915326>. Acesso em: 15 jun. 2021.

MORADORES temem risco de deslizamento de barreira no Ibura. **TV Jornal**, Recife, 16 jun. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=fGgaDjpwGH4>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MURRAY, E. J.; SIVAKUMAR, V. **Unsaturated soils**: A fundamental interpretation of soil behaviour. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd., 2010.

NIEBLE, C. M.; GUIDICINI, G. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1984. 196 p.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos: Ensaio de Laboratório**. São Carlos: EESC-USP, 1995. 248 p.

NUNES, A. J. C. Landslides in soil of decomposed rock due intense rainstorms. In: INTERNACIONAL CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Proceedings** [...]. México, n. 2, p. 547-554, 1969.

O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 28, p. 328–344, 1984.

OLIVEIRA, L. A. A. **Uso da técnica de reflectometria no domínio da frequência para estimativa de umidade em Latossolo Vermelho distroférrico**. Orientador: Prof. Dr. Edson Eiji Matsura. 2016. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2016.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: International Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, 8, 1998, Vancouver, British Columbia, Canada. **Proceedings** [...]. Rotterdam, Netherlands: Balkema, v. 2, p. 1157–1165, 1998.

PALAZZOLO, N.; PERES, D. J.; BORDONI, M.; MEISINA, C.; CREACO, E.; CANCELLIERE, A. Improving Spatial Landslide Prediction with 3D Slope Stability Analysis and Genetic Algorithm Optimization: Application to the Oltrepò Pavese. **Water**, v. 13, n. 6, 2021.

PARK, D. W.; NIKHIL, N. V.; LEE, S. R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 2833–2849, 2013.

PAUL, L. R.; ABATTI, B. H.; MICHEL, G. P. Análise de Desempenho dos Modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS para a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias Taboão e Matador, Rio do Sul (SC). In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23., 2019, Foz do Iguaçu - PR. **Anais** [...]. Porto Alegre - RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019.

Pentech Press, 2006.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na Região Metropolitana do Recife**. Orientador: Profa. Margareth M. Alheiros. 2007. 120 f. Tese (Doutor em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PFALTZGRAFF, P. S. et al. **Sistema de informações geoambientais da Região Metropolitana do Recife**. Recife: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2003.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIZZATO, E.; GRAMANI, M. F. Mapeamento geotécnico aplicado aos riscos geológicos de movimentos gravitacionais de massa. In: GUNTHER, W. M. R.; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, A. C. **Desastres: múltiplas abordagens e desafios**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. cap. 13, p. 237 - 256.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; SCRIVANI, J. A. Fusion of small-footprint LiDAR and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia. **Forest Science**, v. 50, n. 4, p. 551-565, 2004.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 59–80, 1991.

RABACCO, L. M.; FERNANDES, N. The Influence of Topographic Scale in Mass Wasting Susceptibility Modeling Applied to a Pipeline in Southeastern Brazil. **Proceedings of the 2006 ESRI International User Conference**, Redlands – USA, 2006.

RAIA, S.; ALVIOLI, M.; ROSSI, M.; BAUM, R. L.; GODT, J. W.; GUZZETTI, F. Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. **Geosci. Model Dev.**, v. 6, p. 1367–1426, 2013.

RAMOS, M. C. L. S. **Estudo geológico-geotécnico e análise da estabilidade de uma encosta localizada no bairro do Curado II no Município de Jaboatão dos Guararapes - PE**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho. 2019. 195 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2019.

REGINATTO, A.R.; FERRERO, J.C. Collapse potential of soils and soil-water chemistry. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1973, Moscow. **Proceedings** [...]. Moscow: [s. n.], 1973. p. 177-183.

RIOS, T. A. **Compreender e ensinar: por uma docência de qualidade**. 8. ed. São Paulo: Cortez, 2010.

ROCHA, A. P.; SCHULER, C. A. B. Avaliação espaço temporal da suscetibilidade a movimentos de massa utilizando ortofotocartas e modelagem espacial multicritério na dinâmica de áreas de risco nas microrregiões do Jordão e Ibura, Recife-PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, n. 68, p. 1747-1770, 2016.

ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H.R.; DOMINGUEZ, J. M. L. Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. **Earth-Science Reviews**, v. 123, p. 87-112, 2013.

SALCIARINI, D.; GODT, J. W.; SAVAGE, W. Z.; CONVERSINI, P.; BAUM, R. L.; MICHAEL, J. A. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. **Landslides**, v. 3, n. 181, p. 181–194, 2006.

SANTANA, J. K. R. Análise evolutiva da ocupação dos morros da cidade do Recife. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA URBANA, 16., 2019, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: [s. n.], 2019. p. 3754-3768.

SANTANA, R. G. **Análise de soluções de engenharia para estabilização de encostas ocupadas na Região Metropolitana do Recife - PE. Estudo de caso: Ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR 2, Ibura.** 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFPE, Recife, 2006.

SANTOS, A. N. **Estudos geotécnicos e análise da estabilidade de duas encostas localizadas no Ibura no município de Recife-PE.** Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho, 2018. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/33048/1/DISSERTAÇÃO%20Amabelli%20Nunes%20dos%20Santos.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2020.

SANTOS, A. R. dos. **Enchentes e deslizamentos: causas e soluções-áreas de risco no Brasil.** São Paulo: Pini, 2012. 136p.

SCHILIRÒ, L.; CEPEDA, J.; DEVOLI, G.; PICIULLO, L. Regional Analyses of Rainfall-Induced Landslide Initiation in Upper Gudbrandsdalen (South-Eastern Norway) Using TRIGRS Model. **Geosciences**, v. 11, 2021.

SCHILIRÒ, L.; MONTRASIO, L.; MUGNOZZA, G. S. Prediction of shallow landslide occurrence: Validation of a physically-based approach through a real case study. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 134–144, 2016.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 224 p.

SCOTT, P.; QUADROS, M. T. **A diversidade no Ibura: gênero, geração e saúde num bairro popular do Recife.** Editora Universitária UFPE, Recife, 2008.

SENTEK, T. **Calibration Manual:** For Sentek Soil Moisture Sensors. Stepney, South Australia: Sentek Pty Ltd., 2011.

SILVA, M. M. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no Município de Camaragibe - PE.** Orientador: Roberto Quental Coutinho. 2007. 402 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2007.

SKEMPTON, A. W. The Colloidal “Activity” of Clays. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Switzerland. **Proceedings [...]**. Zurich: [s. n.], 1953. p. 57-61

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso).** 2004. 432 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SOUZA, D. O.; NASCIMENTO, M. G.; IWABE, C. M. N. Clima. In: OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (ed.). **Geologia de engenharia e ambiental**. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, cap. 2, p. 22-37.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ARAÚJO, L. E. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 250-268, 2012.

SRIVASTAVA, R.; YEH, T.-C. J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils. **Water Resources Research**, v. 27, p. 753–762, 1991.

SUPO, K. C. L. **Desenvolvimento de permeâmetro de vazão constante de campo**. Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

TARBOTON, D.G. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309–319, 1997.

TEIXEIRA, W. G.; BEHRING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da Mesa de Tensão e da Câmara De Richards. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. Brasília: Embrapa, 2017. cap. 4, p. 34-46.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996.

TRAN, T. V.; LEE, G.; AN, H.; KIM, M. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. **Environ Earth Sci**, v. 76, n. 315, 2017.

VALLEJO, L. I. G. et al, (coord.). **Ingeniería Geológica**. Madrid: Pearson Educación, 2002. 744 p.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D.G. Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength, in Shackelford. In: Advances in unsaturated geotechnics, Denver, Colo., August 5-8, 2000. **Proceedings of Geo-Denver 2000** [...]. Reston, Va., American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication 99, p. 195–209, 2000.

VARGAS, M. Origem e desenvolvimento da geotecnologia no Brasil. **Quipo**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 263-279, 1985.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. **Special report**, v. 176, p. 11-33, 1978.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**: Volume Completo. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 568 p.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. **Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas**. In: Tópicos em Ciência do Solo, v. 4. p. 145-192, 2005.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O.; MARTINS, T. D.; MONTGOMERY, D. R. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 260, 2018.

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D.; LISTO, F. L. R.; MONTGOMERY, D. R. Previsão de escorregamentos rasos utilizando modelos matemáticos em bases físicas. In: GÜNTHER, W. R.; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, A. C. **Desastres: múltiplas abordagens e desafios**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. cap. 14, p. 257-353.

VIEIRA, B. C.; RAMOS, R. Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, p. 161-174, 2015.

VIEIRA, B.C; FERNANDES, N. I.; AUGUSTO FILHO, O. Shallow Landslide Prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Nat. Hazards. Earth Syst. Sci**, v. 10, p. 1829-1837, 2010.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsáveis e expansivos. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: ABMS, 2015. cap. 12, p. 415-440.

ZAIDAN R.I.; FERNANDES N.T. Zoneamento de suscetibilidade a escorregamentos rasos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego do Independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, p. 57-76, 2009.

ZHANG, K.; XUE, X.; HONG, Y.; GOURLEY, J. J.; LU, N.; WAN, Z.; HONG, Z.; WOOTEN, R. ICRESTRIGRS: a coupled modeling system for cascading flood-landslide disaster forecasting. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 20, p. 5035–5048, 2016.

ZHUANG, J.; PENG, J.; WANG, G.; IQBAL, J.; WANG, Y.; LI, W.; XU, Q.; ZHU, X. Prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Loess Plateau, Yan'an, China, using the TRIGRS model. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 42, n. 6, p. 915-927, 2016.

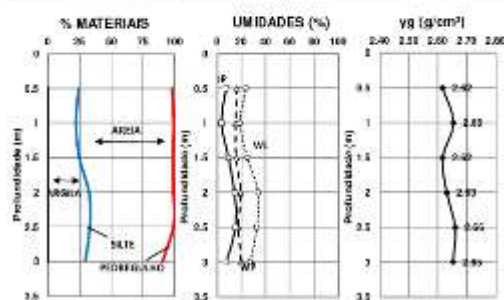
GODT, J.W.; BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; SALCIARINI, D.; SCHULZ, W.H.; HARP, E.L. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. **Engineering Geology**, v. 102, p. 214–226, 2006.

IP, S. C. Y.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A. Three-dimensional slope stability analysis incorporating unsaturated soil properties in Singapore. **GEORISK**, v. 15, 2020.

APÊNDICE A - GRANULOMETRIA, LIMITES DE ATTERBERG E CLASSIFICAÇÃO SUCS DAS AMOSTRAS COLETADAS POR MEIO DO TRADO

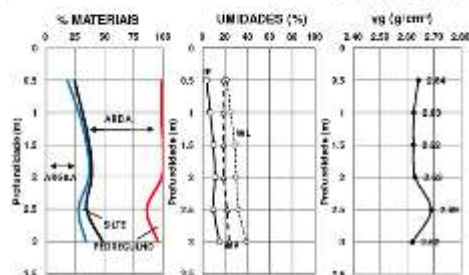
Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS das amostras coletadas no ponto P-06.

PONTO DE ESTUDO: P-06		LAT: 9102540.00 m S		LONG: 285240.00 m E			
LOCAL: RECIFE-UR3 (IBURA)							
AMOSTRA	AMP-6.1	AMP-6.2	AMP-6.3	AMP-6.4	AMP-6.5	AMP-6.6	
PROF (m)	0,00 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00	
PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS (ρ_s (g/cm ³))	2,62	2,65	2,62	2,63	2,65	2,65	
% DOS MATERIAIS (C/DEFLOCULANTE)	ARGILA	31,13	22,13	20,66	12,56	13,38	20,23
	SILTE	10,5	1,6	0,46	0,21	0,91	1,05
	AREIA	58,48	75,51	73,73	65,47	64,72	59,92
	PEDREGULHO	1,90	0,72	1,15	0,74	0,97	0,58
LIMITES DE ATTERBERG (%)	WL	34,50	19,00	25,00	31,00	33,00	27,50
	WP	18,56	15,37	15,64	19,41	17,61	19,93
	IP	7,44	3,63	9,36	14,59	15,39	7,57
	SÍMBOLO	SC	SM	SC	SC	SC	SC
CLASSIFICAÇÃO (SUCS)	DESCRIÇÃO	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRIMIBIL.	AREIA SILTOSA DE BAIXA COMPRIMIBIL.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRIMIBIL.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRIMIBIL.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRIMIBIL.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRIMIBIL.
OBSERVAÇÕES							



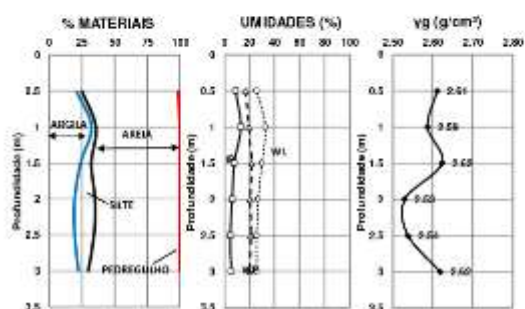
Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS das amostras coletadas no ponto P-07.

PONTO DE ESTUDO: P-07		LAT: 9102540.00 m S		LONG: 285240.00 m E			
LOCAL: RECIFE UR3 (IBURA)							
AMOSTRA		AMP-7.1	AMP-7.2	AMP-7.3	AMP-7.4	AMP-7.5	AMP-7.6
PROF (m)		0,00 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00
PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS (ρ_{gr})		2,64	2,63	2,62	2,63	2,69	2,62
% DOS MATERIAIS (C/DEFLOCULANTE)	ARGILA	14,55	26,32	19,71	17,10	22,83	14,15
	SILTE	5,30	1,22	2,06	2,30	6,92	14,14
	AREIA	75,98	67,34	67,64	69,99	61,13	67,57
	PEDREGULHO	0,83	1,44	0,04	1,10	14,15	4,14
LIMITES DE ATTERBERG (%)	WL	22,00	25,00	25,00	30,00	32,00	19,00
	WP	18,28	18,33	15,99	18,74	21,38	21,71
	IP	3,72	6,97	10,01	11,26	10,62	15,29
CLASSIFICAÇÃO (SUCS)	SÍMBOLO	SM	SM-SC	SC	SC	SC	SC
	DESCRIÇÃO	AREIA SILTOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA E AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.
OBSERVAÇÕES		ÁREA DE COLETA DAS AMOSTRAS COM VASTA PRESENÇA DE VEGETAÇÃO (ASTÚCEA, GRAMINEAS) E ESTUJO. COLORAÇÃO ESCURECIDA DA CAMADA INICIAL INDICA A PRESENÇA DE MATÉRIA ORGÂNICA.					



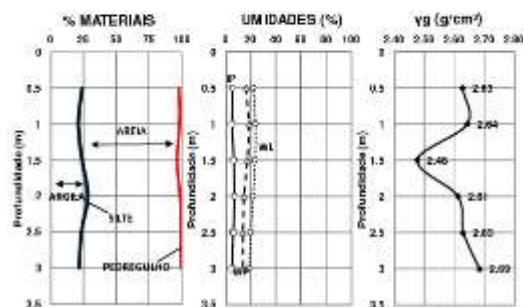
Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS das amostras coletadas no ponto P-08.

PONTO DE ESTUDO: P-08		LOCAL: RECIFE-LAGOA ENCANTADA (COHAB)		LAT: 9102' 59.00 m S	LONG: 2851' 0.00 m E		
AMOSTRA		AMP-8.1	AMP-8.2	AMP-8.3	AMP-8.4	AMP-8.5	AMP-8.6
PROF (m)		0,00 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00
PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRAOS γg (g/cm³)		2,61	2,59	2,62	2,53	2,54	2,62
% DOS MATERIAIS (CORRELACIONTE)	ARGILA	20,96	32,47	25,62	19,47	19,55	22,25
	SILTE	4,16	3,42	8,18	15,53	14,95	7,67
	AREIA	75,41	63,69	67,68	65,90	65,62	69,78
	PEDREGULHO	1,47	0,47	0,12	0,10	0,48	0,30
LIMITES DE ATELBERG (%)	WL	36,00	35,00	30,70	27,00	26,00	26,00
	WP	17,00	19,60	21,93	20,72	21,35	20,44
	IP	9,00	13,36	8,07	6,28	4,65	5,56
CLASSIFICAÇÃO (SUCS)	SÍMBOLO	SM-SC	SC	SC	SM-SC	SM-SC	SM-SC
	DESCRIÇÃO	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.
OBSERVAÇÕES		AMOSTRAGEM COLETADA EM SOLO COM ESTUJO; IDENTIFICAÇÃO DE CONCREÇÕES FERRUGINOSAS					



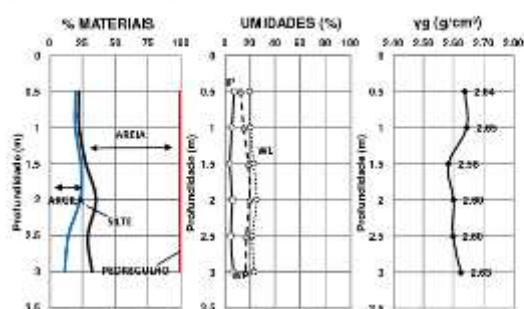
Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS das amostras coletadas no ponto P-09.

PONTO DE ESTUDO: P-09		LOCAL: RECIFE-UR2 (COHAB)		LAT: 9101694,00 m S	LONG: 284845,00 m E		
AMOSTRA		AMP-9.1	AMP-9.2	AMP-9.3	AMP-9.4	AMP-9.5	AMP-9.6
PROF (m)		0,00 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00
PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS γg (g/cm³)		2,63	2,64	2,48	2,61	2,63	2,69
% DOS MATERIAIS (CORRELACIONTE)	ARGILA	21,69	20,64	21,44	27,54	21,12	21,32
	SILTE	0,60	0,50	0,90	1,15	0,40	0,68
	AREIA	73,93	77,30	72,24	70,18	75,23	77,29
	PEDREGULHO	1,87	1,56	3,42	1,13	0,95	0,72
LIMITES DE ATTERBERG (%)	WL	22,00	24,00	23,50	22,00	20,00	19,00
	WP	16,20	18,65	17,21	14,67	13,93	13,72
	IP	5,71	5,35	6,29	7,33	6,07	5,28
SÍMBOLO		SM-SC	SM-SC	SM-SC	SC	SM-SC	SM-SC
CLASSIFICAÇÃO (SUCS)	DESCRIÇÃO	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.
		OBSERVAÇÕES					
		IDENTIFICAÇÃO DE CONCREÇÕES FERRUGINOSAS E PEDREGULHOS QUARTZOSOS					



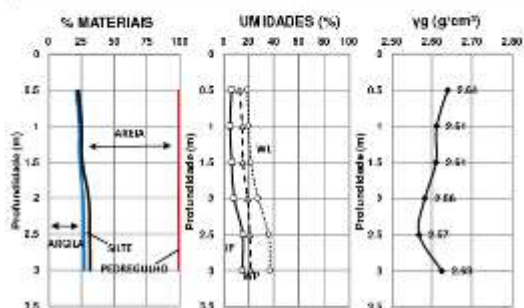
Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS das amostras coletadas no ponto P-10.

PONTO DE ESTUDO: P-10		LOCAL: RECIFE-UR2 (COHAB)		LAT: 9101694.00 m S	LONG: 284845.00 m E		
AMOSTRA		AMP-9.1	AMP-9.2	AMP-9.3	AMP-9.4	AMP-9.5	AMP-9.6
PROF (m)		0,00 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00
PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS γ_g (g/cm³)		2,64	2,65	2,58	2,60	2,60	2,63
% DOS MATERIAIS (C/DEFLOCULANTE)	ARGILA	19,75	19,79	23,92	23,72	14,12	11,70
	SILTE	2,53	3,20	3,73	12,28	14,89	20,78
	AREIA	77,29	76,61	71,27	63,99	70,76	67,16
	PEDREGULHO	0,44	0,80	0,58	0,81	0,23	0,36
LIMITES DE ATTERBERG (%)	WL	20,10	20,50	23,60	25,50	22,60	23,50
	WP	12,71	14,86	18,85	19,61	17,28	16,60
	IP	7,39	5,64	4,75	5,89	4,72	6,90
	SÍMBOLO	SC	SM-SC	SM-SC	SM-SC	SM-SC	SM-SC
CLASSIFICAÇÃO (SUCS)	DESCRIÇÃO	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.
OBSERVAÇÕES							



Granulometria, Limites de Atterberg e Classificação SUCS das amostras coletadas no ponto P-11.

PONTO DE ESTUDO: P-11		LOCAL: RECIFE-UR12 (COHAB)		LAT: 9100743.00 m S	LONG: 284895.00 m E		
AMOSTRA		AMP-11.1	AMP-11.2	AMP-11.3	AMP-11.4	AMP-11.5	AMP-11.6
PROF (m)		0,00 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00
PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS γ _g (g/cm ³)		2,64	2,61	2,61	2,58	2,57	2,63
% DOS MATERIAIS (C/DEFLOCULANTE)	ARGILA	21,64	23,46	29,77	26,37	27,62	27,12
	SILTE	1,86	1,86	1,90	1,29	1,40	1,47
	AREIA	76,50	74,41	71,13	68,57	68,40	68,21
	PEDREGULHO	0,96	0,25	0,20	0,77	0,18	0,17
LIMITES DE ATTERBERG (%)	WL	19,60	20,00	22,60	22,50	26,60	27,00
	WP	12,77	14,84	15,41	19,09	20,73	21,90
	IP	6,73	5,16	6,59	8,41	15,77	15,01
CLASSIFICAÇÃO (SUCS)	SÍMBOLO	SM-SC	SM-SC	SM-SC	SC	SC	SC
	DESCRIÇÃO	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA SILTOSA OU AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.	AREIA ARGILOSA DE BAIXA COMPRESSIB.
OBSERVAÇÕES							



ANEXO A – SONDAGENS SPT DE ESTUDOS ANTERIORES

Descrição da sondagem do ponto P-02.



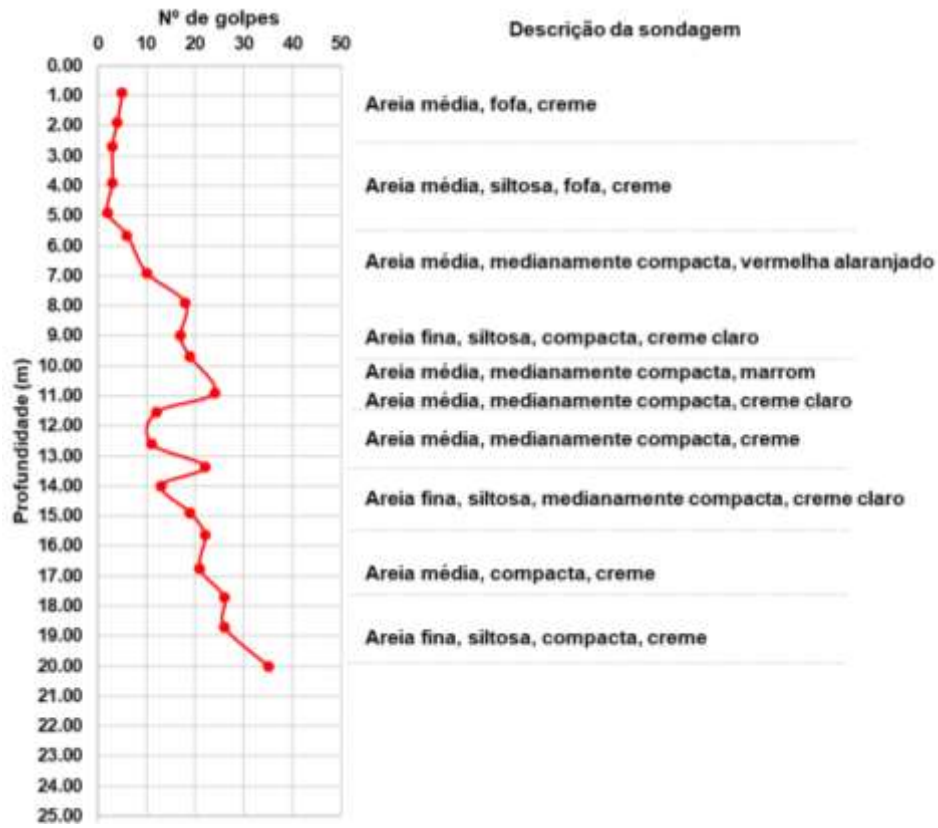
Fonte: Meira (2008).

Descrição da sondagem do ponto P-03.



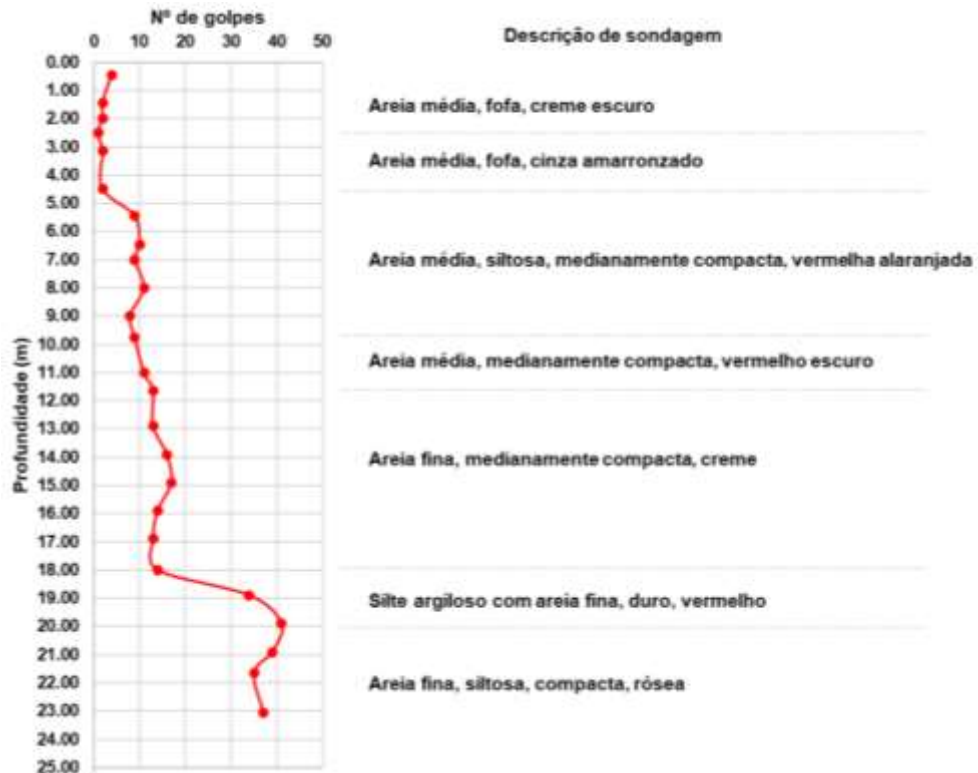
Fonte: Meira (2008).

Descrição da sondagem do ponto P-04.



Fonte: Santos (2018).

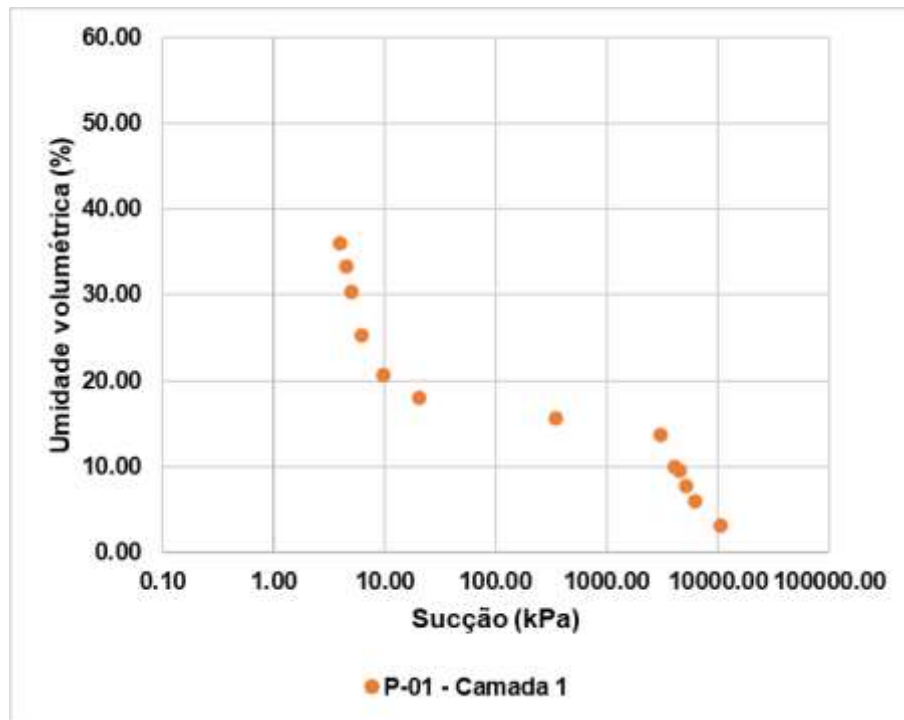
Descrição da sondagem do ponto P-05.



Fonte: Santos (2018).

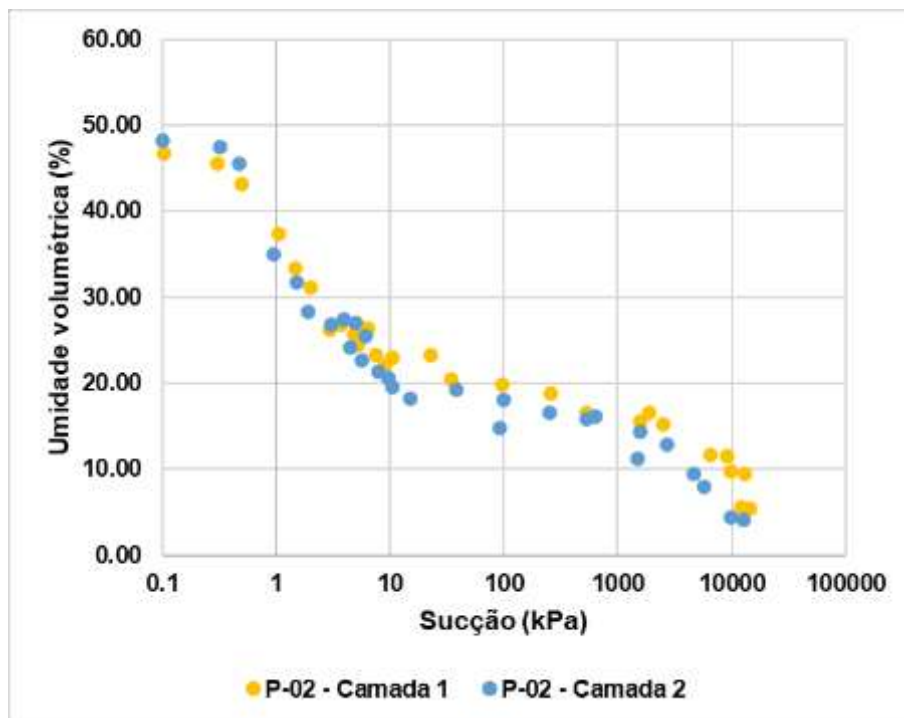
ANEXO B – CURVA CARACTERÍSTICA ESTUDOS ANTERIORES

Curva característica da Camada 1 do Ponto P-01.



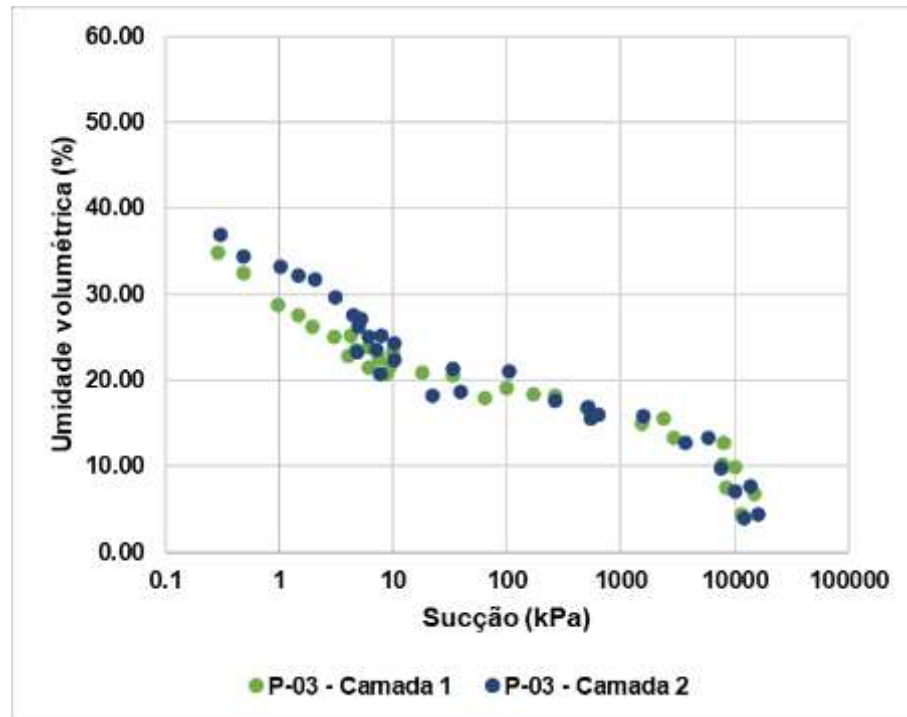
Fonte: Santana (2006).

Curva característica das Camadas 1 e 2 do Ponto P-02.



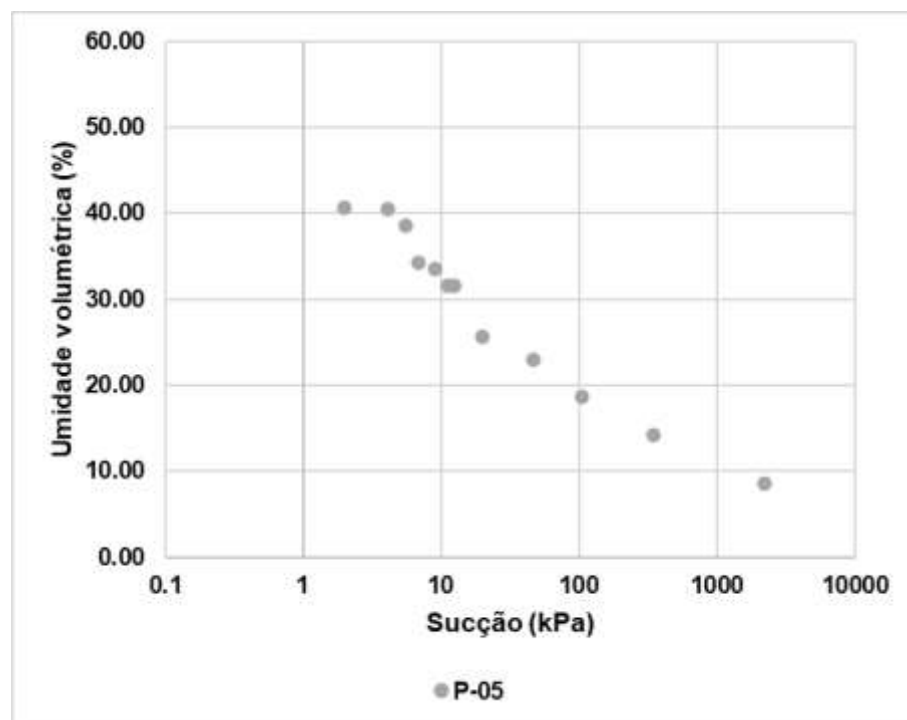
Fonte: Meira (2008).

Curva característica das Camadas 1 e 2 do Ponto P-03.



Fonte: Meira (2008).

Curva característica do Ponto P-05.



Fonte: Santos (2018).