

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRISCILA D'AROZ

ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLOS CORRELACIONADOS À PLUVIOSIDADE, PATO BRANCO – PARANÁ



CURITIBA
2018

PRISCILA D'ARÓZ

ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE
SOLOS CORRELACIONADOS À PLUVIOSIDADE, PATO BRANCO – PARANÁ

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de concentração em Geologia Ambiental, Linha de pesquisa em Geotecnia, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori

Coorientadores: Prof. Dr. Claudinei Taborda da
Silveira e Prof. Dr. Ney Lyzandro
Tabalipa

CURITIBA
2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

D999

D'Aroz , Priscila

Análise de suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solos correlacionados à pluviosidade, Pato Branco – Paraná / Priscila D'Aroz . – Curitiba, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2018.

Orientador: Alberto Pio Fiori – Coorientador: Ney Lyzandro Tabalipa; Claudinei Taborda da Silveira.

1. Escorregamentos translacionais de solo. 2. Fator de segurança (Solo). 3. Gerenciamento de riscos geológico-geotécnicos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fiori , Alberto Pio. III. Silveira, Claudinei Taborda da. IV. Tabalipa, Ney Lyzandro. V. Título.

CDD: 551.6

Bibliotecário: Lidiane do Prado Reis e Silva CRB-8/8579



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de PRISCILA D'AROS intitulada: **ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO CORRELACIONADOS À PLUVIOSIDADE, PATO BRANCO - PARANÁ**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 21 de Maio de 2018.

CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

ADRIANA AHRENDT TALAMINI
Avaliador Externo (UFPR)

CLARICE FARIAN DE LEMOS
Avaliador Externo (UFPR)

À minha família que me apoiou ao longo dessa conturbada jornada,
compreendeu e perdoou minhas inúmeras ausências.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a meus pais José Borges D’Aroz e Marlene Schussler D’Aroz, por guiarem meus passos, pelo apoio a cada conquista e amparo a cada queda. Agradeço pelo aprendizado, pelos valores a mim passados, pelo incentivo, conforto, segurança e amor incondicional.

A minha família pelas horas de risadas, por perdoarem minhas faltas em tantos eventos especiais, pela paciência em serem bons ouvintes e tolerantes com dezenas de escorregamentos, chuvas críticas nem sempre tão críticas assim, fórmulas gigantescas e suas infinitas deduções e mapas coloridos, por serem calma na minha tempestade. Meu porto seguro, sempre.

Obrigada meu amor Giordano por aceitar todas as noites em que renunciei ao seu aconchego, por me apoiar nessa conquista e tornar esse caminho tão mais leve. Obrigada por ter sido companheiro na solidão de seus passeios, trilhas e viagens, pelas noites de luz acesa e barulho de teclas batendo e por compartilhar comigo as loucuras desse TCCM “Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado”.

Aos meus orientadores Prof° Dr. Alberto Pio Fiori, Prof° Dr. Claudinei Taborda da Silveira e Prof° Dr. Ney Lyzandro Tabalipa por me darem a honra de aprender com vocês a cada dia, pelas palavras de carinho e incentivo e por me ensinarem pacientemente a desvendar os mistérios tão complexos do comportamento da natureza e suas consequências. Agradeço especialmente ao Prof° Claudinei pelas tantas sugestões, pelas tantas horas de raciocínio em busca de soluções pros obstáculos que não paravam de surgir, pelo cuidado nas correções, pelas palavras de força e carinho nos meus momentos mais descrentes desse projeto, e por me acolher em seu laboratório e gabinete e repetir por tantas vezes que meu lugar no LAGEO estará sempre reservado.

Agradeço aos meus amigos, aos que me acompanham há muitos anos e principalmente aos que conheci pelas salas de aula e laboratórios do Centro Politécnico UFPR. Um agradecimento especial à Família LAGEO e a todos os que por lá passaram e deixaram saudades, pelas incríveis horas de companheirismo, pela ajuda sempre bem vinda, por dividirem comigo as alegrias e tristezas de ser uma aspirante “geóloga geotécnica”, por me receberem de braços abertos a cada

retorno ao Lar (o bom filho a casa torna) e ouvirem as muitas histórias e desfechos da novela de Pato Branco.

Agradeço especialmente ao Ricardo, Gisele e Andrés pelas muitas tardes dispensadas em prol do desvendamento dos mistérios das equações de fator de segurança, suas incógnitas e transformações complexas no universo GIS. A Ana Paula Rzepkowski, Cynthia Robert de Lima e Maurielle Felix por me acalmarem quando tudo parecia perdido e pelo incentivo ao longo desses dois anos.

Agradeço aos colegas discentes dos Programas de Pós-Graduação em Geologia e Geografia que me auxiliaram das mais diversas formas, com bancos de dados, execução de análises, conselhos e palavras de conforto.

Agradeço a MINEROPAR - ITCG, e ao SIMEPAR pelo fornecimento das bases de dados indispensáveis para a pesquisa.

Por fim, agradeço ao Departamento de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná e seus coordenadores Professores Doutores Maria Cristina de Souza e Fernando Farias Vesely pela oportunidade de aprofundar meus conhecimentos na área do escopo geológico que considero mais fantástica, ao secretário do PPGEOL Kazutoshi Milton Matsugano, sempre prestativo e dedicado, e aos membros do corpo docente que foram meus mestres e compartilharam comigo essa conquista.

Muito obrigada.

“Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

O município de Pato Branco possui histórico de eventos de instabilidade de encostas comumente relacionados às intervenções antrópicas decorrentes do crescimento populacional e subsequente ocupação da área sem planejamento adequado. Escorregamentos translacionais de solo são movimentos de massa gravitacionais deflagrados pela associação de processos geodinâmicos condicionados a fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e antrópicos. A região sudoeste do Paraná registra diversos movimentos de massa, sendo os escorregamentos planares de solos os mais comuns, principalmente se associados a pluviosidade intensa, eventos de chuvas anômalas com tempo de recorrência superior a um ano. A demanda de estudos criteriosos e multidisciplinares para o gerenciamento de riscos geológico-geotécnicos da área urbanizada de Pato Branco está diretamente relacionada à recorrência de movimentos de massa locais. Este trabalho tem por objetivo investigar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo em perímetro urbano, correlacionando esses eventos a episódios de chuvas intensas, mediante uma abordagem que integre informações geográficas, geotécnicas e pluviométricas da área. A pesquisa envolveu a análise da estabilidade de vertentes baseada na teoria do equilíbrio limite e verificação dos limiares críticos de chuva para o município. Foram utilizados modelos determinísticos para o cálculo do fator de segurança (FS) em diferentes perfis de encostas, através de propriedades físicas e mecânicas dos solos (definidas por ensaios laboratoriais), declividade, saturação hídrica e cobertura vegetal. O desenvolvimento de operações em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilitou a representação da superfície terrestre por meio de modelos digitais de terreno (MDT), declividade, e estabilidade de encostas ou fator de segurança. A análise de criticidade dos eventos de chuva e subsequente definição dos índices críticos para o município se deu pela junção de métodos matemáticos e empíricos, que consideram a razão entre o volume hídrico acumulado por evento isolado e a pluviosidade anual média (PAM), e o tempo de recorrência estabelecido por um evento de mesma intensidade e duração. Os dados de FS contemplam oito cenários distintos de saturação hídrica do solo e propensão a escorregamentos. A influência da cobertura vegetal foi também considerada através de cinco classes de suscetibilidade: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. A análise do FS demonstrou que as áreas mais instáveis são encostas com declividades superiores a 20° e que a presença de vegetação, quando não considerada a efetiva influência das raízes, reduz a estabilidade da encosta. A validação dos mapas pelas cicatrizes locais apresentou 87% de compatibilidade entre escorregamentos e áreas de muito alta suscetibilidade a estes eventos em cenários de saturação hídrica superiores a 30%. A correlação dos dados de chuva e FS indicou que escorregamentos translacionais de solo apresentam forte influência antrópica e que não possuem relação direta com episódios de chuvas críticas.

Palavras-chave: Escorregamentos translacionais de solo. Fator de Segurança. Chuva Crítica.

ABSTRACT

The county of Pato Branco presents an event history of slope instability events usually related to anthropogenic interventions arising from population growth and subsequent occupation of the area without proper planning. Translational soil slides are mass movements triggered by gravitational and geodynamic processes conditioned to geological, geomorphological, climatic, hydrological and anthropic factors. The southwest region of the state of Paraná registers various mass movements, with the planar landslide being the most common, especially if associated with intense rainfall, anomalous rainfall events with periodicity of more than one year. The judicious and multidisciplinary studies demand for geological-geotechnical risk management of the urbanized area of Pato Branco, is directly related to the recurrence of mass movements in the region. This study aims to investigate the susceptibility to translational soil sliding in urban area by correlating these events to the episodes of heavy rains, by mean of an approach that integrates geographical, geotechnical and rainfall informations of the area. The research involved the analysis of slopes stability based on the limit equilibrium theory and verification of the critical thresholds of rain to the city. Deterministic models were used for the calculation of the safety factor (SF) in different slopes profiles, accounting for physical and mechanical properties of soils (defined by laboratory tests), declivity, water saturation and vegetation cover. The development of operations in geographic information systems (GIS) allowed the representation of the Earth's surface by means of digital terrain models (DTM), declivity, and stability of slopes or security factor. The criticity analysis of the events and subsequent definition of critical indices was done by merging mathematical and empirical methods, which consider the ratio of the volume of accumulated water for an isolated event to the annual average rainfall (AAR) and the periodicity related to an event of the same intensity and duration. The data of SF included eight different scenarios of water saturation and propensity to landslide. The influence of vegetation cover was also considered through five classes of susceptibility: very low, low, moderate, high and very high. The analysis of the SF has demonstrated that the most unstable areas are slopes with more than 20° of declivity and that the presence of vegetation, when the effective influence of the roots is not considered, reduces the stability of the slope. The validation of the maps by local scars presented 87% of compatibility between landslide and areas of very high susceptibility to these events in scenarios of water saturation greater than 30%. The correlation of rain and SF data indicated that translational soil slides present strong anthropogenic influence and have no direct relationship with episodes of critical rainfalls.

Keywords: Translational Soil Slides. Safety Factor. Critical Rainfall.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 3.1	- MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
FIGURA 3.2	- CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ	33
FIGURA 3.3	- SEÇÃO ESQUEMÁTICA DE DIREÇÃO NW-SE REALÇANDO A INTERCALAÇÃO DOS LITOTIPOS DAS FORMAÇÕES SERRA GERAL E BOTUCATU	34
FIGURA 3.4	- MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA URBANIZADA DE PATO BRANCO	36
FIGURA 3.5	- DETALHES DO RIO LIGEIRO EM DIFERENTES PONTOS DE SEU CURSO	38
FIGURA 3.6	- CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KOPPEN PARA O ESTADO DO PARANÁ	39
FIGURA 3.7	- PRECIPITAÇÃO ANUAL MÉDIA DO ESTADO DO PARANÁ	40
FIGURA 3.8	- VARIAÇÃO TRIMESTRAL DA PLUVIOSIDADE NO ESTADO DO PARANÁ	41
FIGURA 3.9	- MAPA DE SOLOS DA BACIA DO RIO LIGEIRO	44
FIGURA 4.1	- MODELO ESQUEMÁTICO DE ESCORREGAMENTO	54
FIGURA 4.2	- MODELOS ESQUEMÁTICOS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO.....	55
FIGURA 4.3	- MECANISMOS QUE LEVAM A RUPTURA DE UM VERTENTE	56
FIGURA 5.1	- FLUXOGRAMA ORGANIZACIONAL DO PROJETO	83
FIGURA 5.2	- LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS EXISTENTES NA ÁREA DE ESTUDO	90
FIGURA 6.1	- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA	97
FIGURA 6.2	- EXEMPLOS DA COMPILAÇÃO DE DADOS EM TABELAS REALIZADA PARA CADA EVENTO REGISTRADO	105
FIGURA 6.3	- ANÁLISE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO	106
FIGURA 6.4	- COMPILAÇÃO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS PARA OS DIAS SEM REGISTRO DE ETS	107
FIGURA 6.5	- EXEMPLO DOS GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ	109
FIGURA 6.6	- FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE DE VERTENTES NA PRESENÇA DE VEGETAÇÃO	113

FIGURA 6.7	- PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO DEFORMADAS E INDEFORMADAS	114
FIGURA 6.8	- PADRONIZAÇÃO DAS DESCRIÇÕES REALIZADAS IN SITU	115
FIGURA 7.1	- MODELO DIGITAL DE TERRENO	123
FIGURA 7.2	- MODELO DE DECLIVIDADE EM PERCENTUAL	125
FIGURA 7.3	- ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA	127
FIGURA 7.4	- ARRUAMENTO MUNICIPAL DE PATO BRANCO	128
FIGURA 7.5	- EVIDÊNCIAS DE INSTABILIDADE NA ENCOSTA DA RUA PEDRO RAMIRES DE MELO	129
FIGURA 7.6	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO DE 17/10/2000	130
FIGURA 7.7	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE SETEMBRO DE 2013	132
FIGURA 7.8	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 02/12/ 2013	133
FIGURA 7.9	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO DE 08 E 27/06/2014	134
FIGURA 7.10	- DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS NOS DIAS 08 E 27/06/2014	135
FIGURA 7.11	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 07/11//2014	136
FIGURA 7.12	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 10/12/2015	137
FIGURA 7.13	- DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS ENTRE OS DIAS 29/10/2017 A 04/11/2017	138
FIGURA 7.14	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 04/11/2017	139
FIGURA 8.1	- MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	144
FIGURA 8.2	- MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA URBANIZADA DE PATO BRANCO	146
FIGURA 8.3	- FLUXOGRAMA ORGANIZACIONAL DO PROJETO	148
FIGURA 8.4	- MODELO DE DECLIVIDADE EM GRAU	150
FIGURA 8.5	- FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE DE VERTENTES NA PRESENÇA DE VEGETAÇÃO	152
FIGURA 8.6	- LOCALIZAÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO	155
FIGURA 8.7	- COMPILAÇÃO DE DADOS DO ETS DE 10/12/2015	158

FIGURA 8.8	- ENCOSTA NATURALMENTE INSTÁVEL	163
FIGURA 8.9	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE SETEMBRO DE 2013	165
FIGURA 8.10	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO DE 08 E 27/06/2014	166
FIGURA 8.11	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 20 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO	167
FIGURA 8.12	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 30 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO.....	168
FIGURA 8.13	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 40 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO.....	169
FIGURA 8.14	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 50 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO	170
FIGURA 8.15	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 60 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO.....	171
FIGURA 8.16	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 70 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO.....	172
FIGURA 8.17	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 0 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO.....	174
FIGURA 8.18	- SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO – 100 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO.....	175
FIGURA 8.19	- VALIDAÇÃO DO MODELO PREDITIVO DE FATOR DE SEGURANÇA PELA SOBREPOSIÇÃO DE CICATRIZES	176
FIGURA 8.20	- EVOLUÇÃO DA ÁREA FACE AO AUMENTO CONSECUTIVO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO	177
FIGURA 8.21	- SOBREPOSIÇÃO DE CICATRIZES DE ETS AOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS	178
FIGURA 8.22	- LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 04/11/2017	180
FIGURA 8.23	- INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO MODELO PREDITIVO DE FATOR DE SEGURANÇA	181
FIGURA 8.24	- GRÁFICO DE CHUVA ACUMULADA POR EVENTO DE ETS	185
FIGURA 8.25	- GRÁFICO DE CHUVA ACUMULADA SEM ETS REGISTRADO	186
FIGURA 10.1	- PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2000	200

FIGURA 10.2	- PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2013	201
FIGURA 10.3	- PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2014	202
FIGURA 10.4	- PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2015	203
FIGURA 10.5	- PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2017	203

LISTA DE TABELAS

TABELA 01	-	ABRANGENCIA DOS SOLOS AFLORANTES NA ÁREA DE ESTUDO	44
TABELA 02	-	CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA	48
TABELA 03	-	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS	50
TABELA 04	-	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS GRANDES GRUPOS DE PROCESSOS DE ESCORREGAMENTO.....	51
TABELA 05	-	PADRÕES DOS MOVIMENTOS DE MASSA SEGUNDO SANTOS (2004).....	52
TABELA 06	-	CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA EM ENCOSTAS	53
TABELA 07	-	CLASSIFICAÇÃO DOS FATORES DEFLAGRADORES DOS MOVIMENTOS DE MASSA	59
TABELA 08	-	REGISTROS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO (ETS)	86
TABELA 09	-	EXEMPLO DE DIAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS INTENSAS, SEM REGISTROS DE MOVIMENTOS DE MASSA	87
TABELA 10	-	ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE PATO BRANCO – PR. BASE DE DADOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS	89
TABELA 11	-	MÉDIA PLUVIOMÉTRICA ACUMULADA NOS DIAS DE OCORRÊNCIA DE ETS, CONSIDERANDO A DESTRUIÇÃO LOCAL DAS CHUVAS	91
TABELA 12	-	DADOS METEOROLÓGICOS HISTÓRICOS DA ESTAÇÃO PATO BRANCO (02652035 - IAPAR/SIMEPAR)	93
TABELA 13	-	CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO SEGUNDO COM A DECLIVIDADE	96
TABELA 14	-	ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICO DISCRETIZADO EM 6 CLASSES	98
TABELA 15	-	NORMATIZAÇÃO UTILIZADA EM ENSAIOS LABORATORIAIS	116
TABELA 16	-	SOLOS MAIS REPRESENTATIVOS DA ÁREA URBANA DE PATO BRANCO SEGUNDO O MAPEAMENTO DE SOLOS DA EMBRAPA DE 1999.....	118
TABELA 17	-	PARÂMETROS UTILIZADOS NOS MAPAS DE FS	120

TABELA 18	-	CLASSIFICAÇÃO QUANTO A SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTO	121
TABELA 19	-	CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO SEGUNDO COM A DECLIVIDADE	149
TABELA 20	-	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A CONFECÇÃO DOS MAPAS DE FS	153
TABELA 21	-	REGISTROS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO	154
TABELA 22	-	EVENTOS DE CHUVA E ACUMULAÇÃO HÍDRICA EM ATÉ 96H ANTECEDENTES AOS ETS	156
TABELA 23	-	CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS QUANTO A INTENSIDADE DA PRECIPITAÇÃO	156
TABELA 24	-	EXEMPLO DE DIAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS INTENSAS, SEM REGISTROS DE MOVIMENTOS DE MASSA	158
TABELA 25	-	FATOR DE SEGURANÇA AFERIDO NOS PONTOS DE RUPTURA	182
TABELA 26	-	INTENSIDADE CRÍTICA PARA DIETRICH E MONTEGOMERY (1998) QUANDO FS = 1,00	183
TABELA 27	-	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM ATÉ 96 HORAS.....	185
TABELA 28	-	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM ATÉ 96 HORAS SEM ETS REGISTRADO.....	186
TABELA 29	-	COEFICIENTES DE PERICULOSIDADE DE CHUVAS.....	187
TABELA 30	-	COEFICIENTES DE PERICULOSIDADE DE CHUVAS SEM REGISTRO DE ETS.....	188
TABELA 31	-	PRECIPITAÇÃO SOBRESALENTE POR PERÍODO.....	189
TABELA 32	-	INTENSIDADE MÁXIMA DE CHUVA	190
TABELA 33	-	INDICE CRITICO (I) PARA AS DATAS COM OCORRENCIAS DE ETS.....	191
TABELA 34	-	INDICE CRITICO (I) PARA AS DATAS SEM REGISTRO DE ETS..	191
TABELA 35	-	CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO CRITICA E ESCORREGAMENTOS DE SOLO.....	192

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	- Agência Nacional das Águas
ANP	- Agência Nacional do Petróleo
APP	- Área de Preservação Permanente
ASWS	- Antecedent Soil Water Status
CC	- Coeficiente de Ciclo
CE	- Coeficiente de Episódio
CF	- Coeficiente Final
CEMADEN	- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CENAD	- Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CEPED	- Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres
CEPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
CPRM	- Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte
ED	- Limiares tipo Evento – Duração
EI	- Limiares tipo Evento-Intensidade
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	- Environmental Systems Research Institute
ETS	- Escorregamento Translacional de Solo
EUA	- Estados Unidos da América
FGV	- Fundação Getúlio Vargas
FS	- Fator de Segurança
GEO	- Hong Kong Geotechnical Engineering Office
GEO-RIO	- Fundação Instituto de Geotécnica Rio de Janeiro

IAPAR	- Instituto Agrônômico do Paraná
IC	- Intensidade crítica
ID	- Limiares tipo Intensidade - Duração
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPARDES	- Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPT	- Índice de Posição Topográfica
ITCG	- Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná
LAGEO	- Laboratório de Pesquisas Aplicadas e Geomorfologia e Geotecnologias
LAME	- Laboratório de Materiais e Estruturas
LL	- Limite de Liquidez
LP	- Limite de Plasticidade
MDT	- Modelo Digital do Terreno
MME	- Ministério de Minas e Energia
MINEROPAR	- Minerais do Paraná - Serviço Geológico do Paraná
NA	- Nível de Água
NBR	- Norma Brasileira
PAM	- Pluviometria Anual Média
PARANACIDADE	- Secretaria de Desenvolvimento Urbano
PNGRRD	- Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres
S2ID	- Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
SBCS	- Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SHALSTAB	- Shallow Landsliding Stability
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SIMEPAR	- Sistema Meteorológico do Paraná
SINMAP	- Stability Index MAPping
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SUDESUL	- Superintendência do Desenvolvimento da Região Sul

- TR - Tempo de Recorrência
- UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
- UFPR - Universidade Federal do Paraná
- UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- UTM - Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

h_a	- altura da zona de solo saturado	[m]
ϕ	- ângulo de atrito interno do solo	[graus]
θ	- ângulo raiz / plano de escorregamento	[graus]
a	- área de contribuição da bacia	[m ²]
Cfa	- clima subtropical	
Cfb	- clima temperado	
C	- coeficiente de arrasto dos ventos	
C_s	- coesão do solo	[kPa]
b	- comprimento da seção da curva de nível	[m]
Q_c	- chuva crítica	[mm/h]
ρ	- densidade da massa de ar	[kg/m ⁻³]
h	- espessura do perfil de solo	[m]
K	- fator de frequência da chuva	[dias]
F_s	- fator de segurança	
F_{ve}	- força dos ventos	[km/h]
i	- inclinação da vertente	[graus]
I	- intensidade da chuva	[mm/h]
\bar{Z}	- média da elevação	[m]
m	- parâmetro relativo à estação pluviográfica	
n	- parâmetro relativo à estação pluviográfica	
P_a	- peso das árvores	[Kg]
γ_a	- peso específico da água	[kN/m ⁻³]
γ_{nat}	- peso específico do solo natural	[kN/m ⁻³]
γ_{sat}	- peso específico do solo saturado	[kN/m ⁻³]
γ_{sub}	- peso específico do solo submerso	[kN/m ⁻³]
σ_a	- pressão exercida pelo peso das árvores	[kPa]
σ_{ve}	- pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal	[kPa]

Z_0	- ponto central médio	[m]
R	- raio	[m]
t	- tempo de precipitação	[min]
TR	- tempo de recorrência	[anos]
T	- tensão suportada pelas raízes	[kPa]
Tm	- transmissividade do solo	[m ² /dia]
μ_a	- velocidade dos ventos	[km/h]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	25
2.	OBJETIVOS	29
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	29
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.1	LOCALIZAÇÃO	30
3.2	GEOLOGIA	32
3.3	FISIOGRAFIA	37
3.3.1	Hidrografia	37
3.3.2	Clima	39
3.3.3	Geomorfologia	41
3.3.4	Pedologia	42
3.3.4.1	Latossolos	45
3.3.4.2	Cambissolos	45
4.	ESTADO DA ARTE	47
4.1	MOVIMENTOS DE MASSA	47
4.1.1	Escorregamentos	53
4.1.2	Agentes Desencadeadores e Variáveis Condicionantes de Movimentos de Massa	56
4.1.2.1	Geologia	59
4.1.2.2	Pedologia	60
4.1.2.3	Geomorfologia	62
4.1.2.4	Cobertura Vegetal	63
4.1.2.5	Ação Antrópica	66
4.1.2.6	Clima	65
4.2	ESCORREGAMENTOS E CHUVAS INTENSAS	68
4.3	MODELOS BASEADOS EM PROCESSOS FÍSICOS	73
4.4	MODELOS EMPIRICOS	75
4.5	MODELOS PREVISIONAIS DE INSTABILIDADE DE ENCOSTAS	78
4.5.1	Análises a Partir da Distribuição dos Deslizamentos no Campo	79
4.5.2	Análises a Partir de Mapeamentos Geomorfológicos e/ou Geotécnicos	79
4.5.3	Modelos Probabilísticos	80

4.5.4	Modelos Determinísticos	81
5.	MATERIAIS	83
5.1	DADOS TOPOGRÁFICOS.....	83
5.2	DADOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS	84
5.3	PARÂMETROS FÍSICOS DAS VERTENTES	84
5.4	DADOS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO	85
5.5	EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS INTENSOS SEM REGISTROS DE MOVIMENTOS DE MASSA	87
5.6	DADOS METEOROLÓGICOS	88
6.	MÉTODOS	94
6.1	MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)	94
6.1.1	Atributos Topográficos.....	95
6.1.1.1	Declividade.....	95
6.1.1.2	Índice de Posição Topográfica (IPT)	96
6.2	CHUVAS INTENSAS.....	98
6.2.1	Modelo de Fendrich (2003)	98
6.2.2	Chuva Crítica Segundo Parâmetros Hidrológicos e Geotécnicos	100
6.3	TRATAMENTO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS	103
6.4	INVENTÁRIO DE CICATRIZES	110
6.5	SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTO DE SOLO – FATOR DE SEGURANÇA.....	110
6.5.1	Cenários de Saturação Hídrica do Solo	113
6.5.2	Parâmetros Considerados.....	116
7.	RESULTADOS PRELIMINARES	122
7.1	MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)	122
7.2	ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS	124
7.2.1	Declividade.....	124
7.2.2	Índice de Posição Topográfica (IPT)	126
7.3	INVENTÁRIO DE CICATRIZES	128
8.	RESULTADOS E DISCUSÕES	140
8.1	INTRODUÇÃO.	142
8.1.1	Caracterização da Área de Estudo	145
8.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	148
8.2.1	Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais de Solo.	148

8.2.2	Chuvas Críticas e Eventos Pluviométricos Extremos.	154
8.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	163
8.3.1	Fator de Segurança	165
8.3.2	Análises dos Índices Pluviométricos Críticos	182
8.3.2.1	Chuvas Críticas (Qc)	182
8.3.2.2	Precipitação x Pluviosidade Anual Média (PAM)	187
8.3.2.3	Chuva Crítica e Tempo de Recorrência (Tr)	189
9.	CONCLUSÕES	193
10.	RESULTADOS ADICIONAIS	200
11.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	205
	REFERENCIAS	206

1. INTRODUÇÃO

O Brasil registra todos os anos centenas de acidentes naturais, eventos adversos causados por processos geodinâmicos que quando deflagrados em centros urbanos, tendem a causar sérios danos estruturais e físicos. Os acidentes naturais variam de acordo com a localidade de ocorrência, os mais comuns em escala nacional são: deslizamentos de terra e rocha, inundações, ressacas, secas, incêndios florestais e tempestades. A magnitude destes fenômenos e suas consequências podem classifica-los como desastres naturais, envolvendo extensivas perdas humanas, materiais, econômicas e ou ambientais.

Diante da recorrência e agravamento de desastres naturais, a atenção da sociedade se intensificou, fazendo com que o Governo Federal inserisse na última década o tema gestão de riscos e desastres em sua agenda prioritária.

Cabe destacar a condução de três importantes iniciativas da Secretaria Nacional de Defesa Civil no ano de 2012, visando o conhecimento do histórico e perfil dos desastres no Brasil, as quais possibilitaram a distribuição espacial e temporal desses eventos, além da identificação dos principais danos causados por eles.

A primeira iniciativa refere-se à elaboração do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: Volume Brasil, organizado pelo Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED), da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. A segunda faz menção ao Diagnóstico do Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres (PNGRD), organizado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Por fim, a terceira está relacionada ao Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), o qual tornou públicas as informações oficiais sobre desastres no Brasil e possibilitou, entre outras funções, a construção de um banco de dados confiável sobre desastres no país.

O Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) lançou em 2012 o primeiro anuário brasileiro de desastres naturais referentes aos desastres registrados oficialmente nas cinco regiões do país no ano de 2011. Foram registrados 795 desastres naturais, os quais afetaram 12.535.401 pessoas e causaram 1.094 óbitos, sendo 87,95% destes na região serrana do Rio de Janeiro.

Quanto aos municípios, 2.370 foram afetados, sendo 65,44% deles por eventos hidrológicos. A região Sul foi a mais atingida pelos desastres de 2011 com 1.247 municípios e 6.855.449 pessoas afetados, e ainda 106 óbitos (CENAD, 2012).

O estado do Paraná é castigado anualmente por eventos naturais relacionados a chuvas intensas. A região serrana do estado concentra o maior índice de ocorrências de movimentos de massa com poder destrutivo elevado, por essa razão é constantemente estudada visando à previsão e mitigação destes eventos. A defesa civil do Paraná registrou entre os anos de 2008 e 2018, 219 ocorrências de deslizamento de terra, dos quais 28 na região sudoeste. Essa região embora apresente registros anuais de acidentes naturais, carece de estudos previsionais. Pato Branco registrou no mesmo período 43 ocorrências relacionadas a chuvas, destas oito de deslizamentos e 33 de chuvas intensas e tempestades, bem como o município vizinho de Francisco Beltrão que registrou 66 acidentes urbanos decorrentes de chuva, dos quais cinco são deslizamentos e 44 de chuvas intensas e tempestades.

Os meses de máxima e mínima precipitação em território nacional são acompanhados pelos maiores e menores registros de eventos de deslizamentos, respectivamente (FACETO *et al.*, 2012). Sendo evidente a sazonalidade na distribuição de precipitação e escorregamentos de solo, os períodos mais críticos para estes eventos ocorrem em épocas chuvosas, principalmente nos meses de verão, sendo o oposto verificado para o inverno.

Movimentos de massa gravitacionais ganham destaque no contexto de acidentes urbanos devido ao considerável poder destrutivo. Deslizamentos e escorregamentos de solo são processos naturais de transporte de massa pela ação da gravidade devido à dinâmica geomorfológica das encostas, em grande parte agravados e acelerados pela interferência antrópica e condições climáticas (MOLINA *et al.*, 2015).

Encostas naturais tem sua estabilidade condicionada a determinados fatores, sendo os primordiais a geologia e a geomorfologia, acrescidos da fisiografia da área. Essas feições estão sujeitas a alterações, naturais ou antrópicas, que interferem diretamente na estabilidade de uma encosta ou vertente. As características geológicas mais significativas são a estrutura e mineralogia das rochas, essenciais para a pedogênese ou formação de solo. Quanto às

características morfológicas do terreno, destacam-se a declividade e o tipo de relevo predominante no local, resultados da geologia condicionada ao intemperismo. A fisiografia regional é de suma importância no perfil de estabilidade de uma encosta, nesta categoria inclui-se o clima, o regime de chuvas, o tipo de cobertura vegetal, entre outros.

Escorregamentos estão comumente relacionados a grandes quantidades de chuva, onde a infiltração da água no solo aumenta a pressão entre os grãos e diminui a resistência ao cisalhamento, causando a ruptura do sistema e o deslocamento do material pela encosta (TABALIPA, 2008). Segundo Tominaga (2009), escorregamentos translacionais de solo são mais suscetíveis em regiões de moderada à alta declividade, perfis de solo com boa permeabilidade e capilaridade que condicionam a rápida infiltração. Quando ocorrem em encostas próximas a habitações ou áreas urbanizadas, estes eventos comumente são considerados desastres naturais, causando onerosos danos estruturais e perda de vidas humanas, dos 1094 óbitos registrados no Brasil no ano de 2011, 41,14% ou 472 mortes foram decorrentes de movimentos de massa em encostas (CENAD, 2012).

A ação antrópica de maneira geral contribui para o desequilíbrio das encostas nas regiões urbanizadas e porções adjacentes a estas. As ocupações desordenadas sem planejamento urbano ou estudos que considerem os condicionantes geológicos, geotécnicos e fisiográficos do terreno, além da utilização inadequada do solo, têm causado nas últimas décadas uma intensificação dos estudos na busca de soluções para um planejamento sustentável do ambiente construído (BRESSANI e BERTUOL, 2010).

De acordo com o CENAD não há registro de um significativo evento de movimento de massa em Pato Branco, mas a expansão urbana desenfreada é vista de forma preocupante em face de potenciais de acidentes urbanos futuros por apresentar condicionantes topográficos favoráveis à ocorrência de escorregamentos. A área urbanizada de Pato Branco foi estabelecida como objeto desse estudo devido à disponibilidade de uma vasta gama de dados geotécnicos de solo coletados em trabalhos anteriores, qualidade e disponibilidade de dados cartográficos digitais em escala compatível com este projeto, e por possuir estações meteorológicas no perímetro urbano com dados históricos de chuva dos últimos 45 anos.

Esta pesquisa busca investigar qual é a suscetibilidade pontual da área urbanizada de Pato Branco quanto à ocorrência de escorregamentos translacionais de solo, e entender a influência de eventos pluviométricos intensos na deflagração destes. Busca ainda, estabelecer os índices pluviométricos críticos para o município considerando as características da área diante de cenários de chuvas intensas e isoladas, ou eventos prolongados com acumulados hídricos de até 96 horas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Determinar a suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos translacionais de solo da porção urbanizada do Município de Pato Branco buscando a correlação dos eventos ocorridos entre 1998 e 2018 com a pluviosidade registrada no dia (mm/24h) e o acumulado hídrico antecedente em até quatro dias (mm/96h), tendo como base o índice pluviométrico crítico do município.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Classificar a área urbanizada de Pato Branco quanto à suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos translacionais de solo a partir das características geotécnicas dos solos (Fator de Segurança).
- Definir a evolução do comportamento do cenário urbano face ao aumento consecutivo do teor de chuva e subsequente infiltração e saturação do perfil de solo, considerando a influência da vegetação.
- Determinar as intensidades das chuvas ditas críticas para Pato Branco, através de características isoladas dos eventos pluviométricos e dados hidrológicos associados às características físicas das vertentes.
- Estabelecer os teores de chuva deflagradores dos escorregamentos de solo registrados na cidade entre os anos de 1998 e 2018.
- Correlacionar a ocorrência de escorregamentos com eventos pluviométricos críticos e ou eventos extremos.
- Determinar a influência da pluviosidade isolada (por evento), diária e acumulada em até quatro dias na deflagração de movimentos de massa no município.

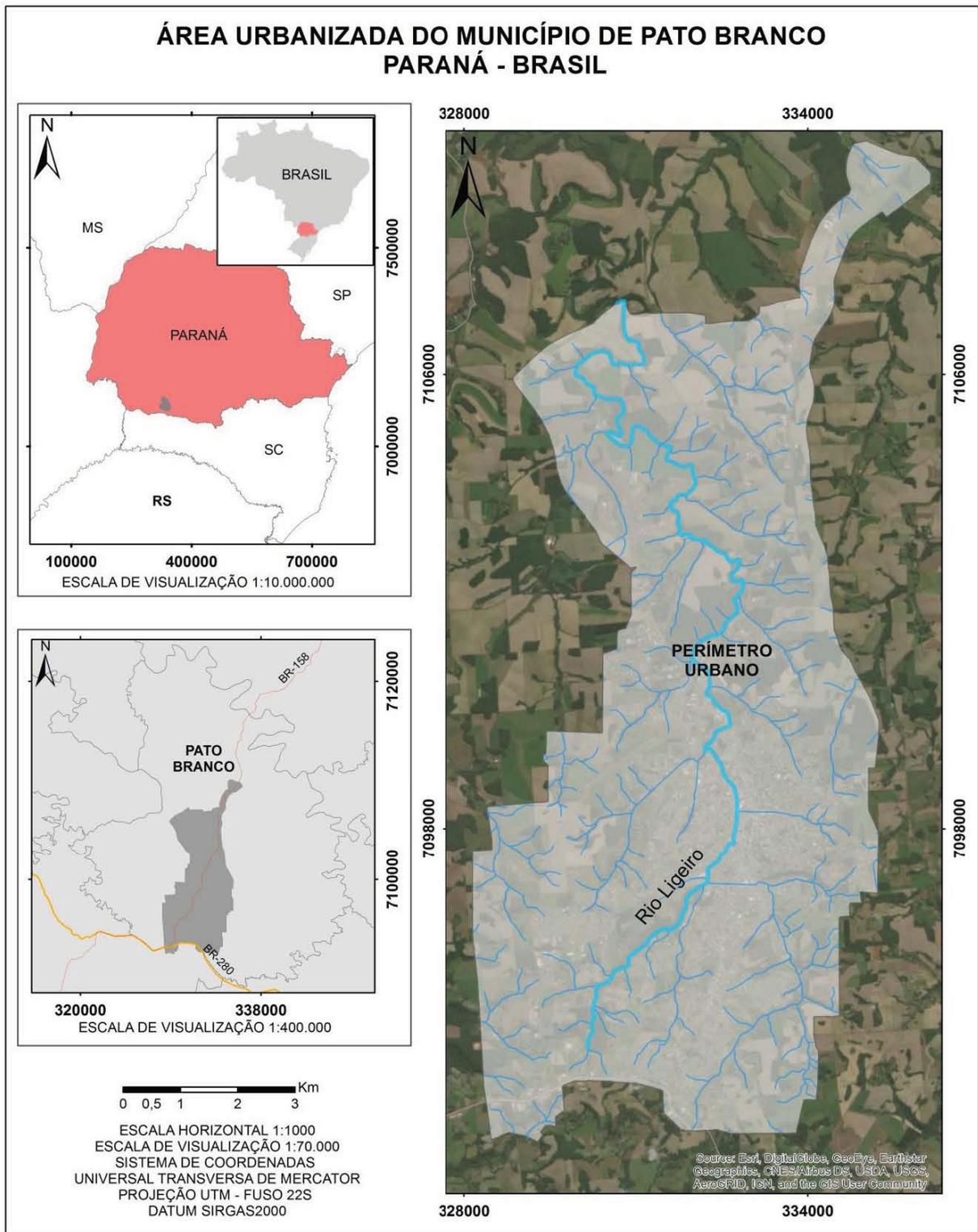
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de interesse para essa pesquisa é porção urbanizada de Pato Branco no estado do Paraná, segundo a delimitação realizada em 2016 pela Prefeitura da cidade (Figura 3.1). Localizado à aproximadamente 433 km de Curitiba, o acesso à área de estudo se dá preferencialmente por dois trajetos: através do contorno norte de Curitiba pela BR-277 e seguindo por esta, até o cruzamento com a BR-158 no terceiro planalto, a BR-158 cruza o centro urbano de Pato Branco; o segundo trajeto parte do contorno sul de Curitiba pela BR-476 até o município de Porto União e segue pela BR-280 que corta a porção sul da área urbana de Pato Branco.

Com área de 539 km², Pato Branco faz fronteira com sete municípios vizinhos. Limitado a norte e a nordeste por Coronel Vivida, a leste por Honório Serpa e Clevelândia, a sudeste por Mariópolis, ao sul e sudoeste por Vitorino, a oeste por Bom Sucesso do Sul, e a nordeste por Itapejara d'Oeste (IPARDES, 2016). De acordo com a estimativa do IBGE para 2017, Pato Branco tem 80.710 habitantes dos quais 94% residem no perímetro urbano que têm 76,46 Km² de área e encontra-se na porção centro sul do município com um formato alongado segundo o leito do rio Ligeiro que corta a cidade de norte a sul (IBGE, 2010).

FIGURA 3.1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2018)

3.2 GEOLOGIA

A Bacia Paraná é uma unidade geotectônica da porção centro-oriental da América do Sul e noroeste da Namíbia, possui cerca de 1,7 milhões de km², ocupa parte dos territórios do Brasil (1,1 milhão de km²), Argentina, Uruguai, Paraguai e seu extremo NE (cerca de 5%) se situa no oeste da Namíbia, onde é denominada Bacia de Huab (JERRAM *et al.*, 1999). Tem cerca de 1.900 km segundo N-S, entre as cidades de Durazno (Uruguai) e Morrinhos (MT), e largura aproximada de 900 km, entre as cidades de Aquidauana (MS) e Sorocaba (SP) (WILDNER *et al.*, 2006). O registro sedimentar e vulcânico tem espessura acumulada de cerca de 7.500 m, com início da deposição no Ordoviciano e término no Cretáceo, compreendendo um intervalo de 385 milhões de anos. Fúlvaro *et al.* (1982) a classificam como intracontinental, cratônica, do tipo 2A Complexa.

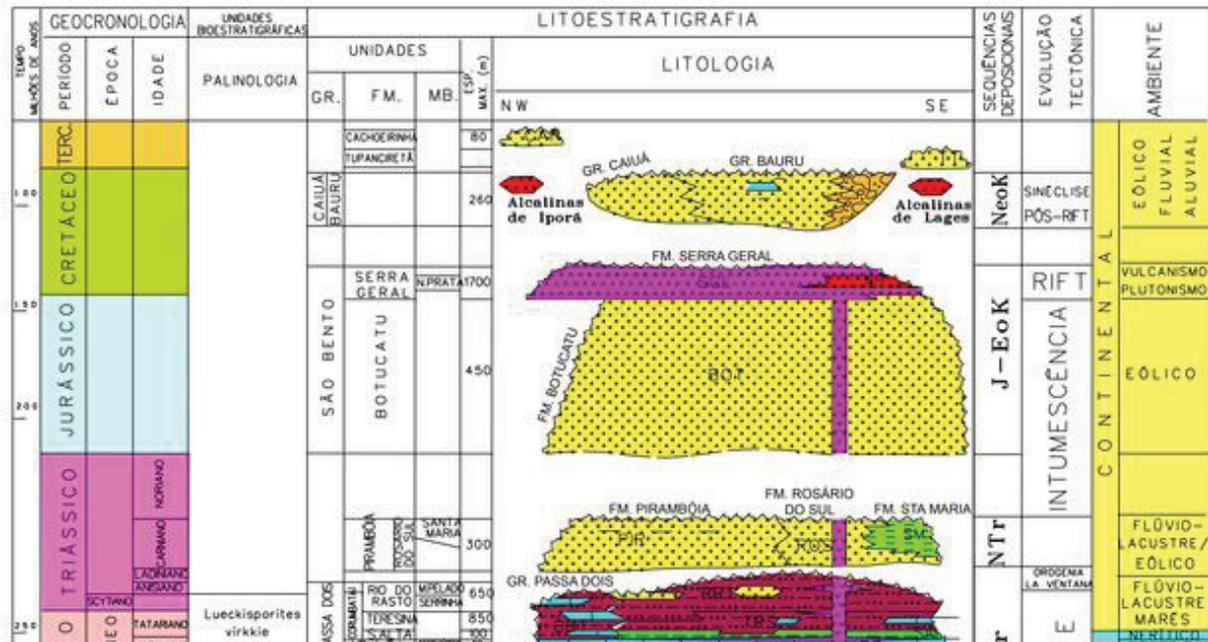
A área de estudo encontra-se sobreposta a Supersequência Gondwana III. Milani (1997) registra que o conjunto vulcano-sedimentar Botucatu-Serra Geral situa-se entre duas discordâncias regionais que caracterizam consideráveis lacunas no registro estratigráfico e de importante significado na história evolutiva da bacia, Figura 3.2. O conjunto Botucatu-Serra Geral possui cerca de 1.750 metros de espessura no depocentro e um representa intervalo deposicional de cerca de 22 milhões de anos.

A discordância basal da supersequência Gondwana III é vasta superfície de deflação eólica que marca o limite do ciclo de sedimentação das supersequências precedentes Gondwana II, restrita ao setor da bacia que se estende do Rio Grande do Sul ao Uruguai, e Gondwana I, no restante da bacia. Fruto de clímax da aridez no interior gondwânico, a discordância caracteriza prolongado período de interrupção da sedimentação associado ao rearranjo da morfologia da bacia (POMPEAU *et al.*, 1985), o que favoreceu que camadas eólicas Botucatu se depositassem sobre as diversas unidades sedimentares precedentes, inclusive o embasamento.

O topo da Supersequência Gondwana III é a Formação Serra Geral, predominantemente vulcânica, e que marca expressivo episódio magmático eocretácico relacionado com a ruptura do Continente de Gondwana e consequente abertura do Oceano Atlântico Sul. Apesar do contato entre as formações Botucatu e Serra Geral ser uma não conformidade, a alternância entre arenitos eólicos e lavas, ao longo de

certo intervalo estratigráfico, permite interpretá-lo como transicional (SCHERER, 2002).

FIGURA 3.2 - CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ



FONTE: Modificado de MILANI (1995)

A ruptura e separação do Gondwana durante o Cretáceo Inferior foi acompanhada por um expressivo evento vulcânico que cobriu a porção centro-sul da América do Sul e o noroeste da Namíbia e formou a Província Ígnea Continental Paraná – Etendeka, uma das maiores províncias vulcânicas de basaltos de platô do planeta (WILDNER *et al.*, 2006).

A evolução geológica do sudoeste do Paraná pode ser entendida a partir do intenso magmatismo fissural do Cretáceo Superior que depositou um espesso pacote de rochas básicas, intercaladas localmente com litotipos intermediário a ácidos (Membro Nova Prata), sobre as rochas da Formação Botucatu (ARIOLI *et al.*, 2013).

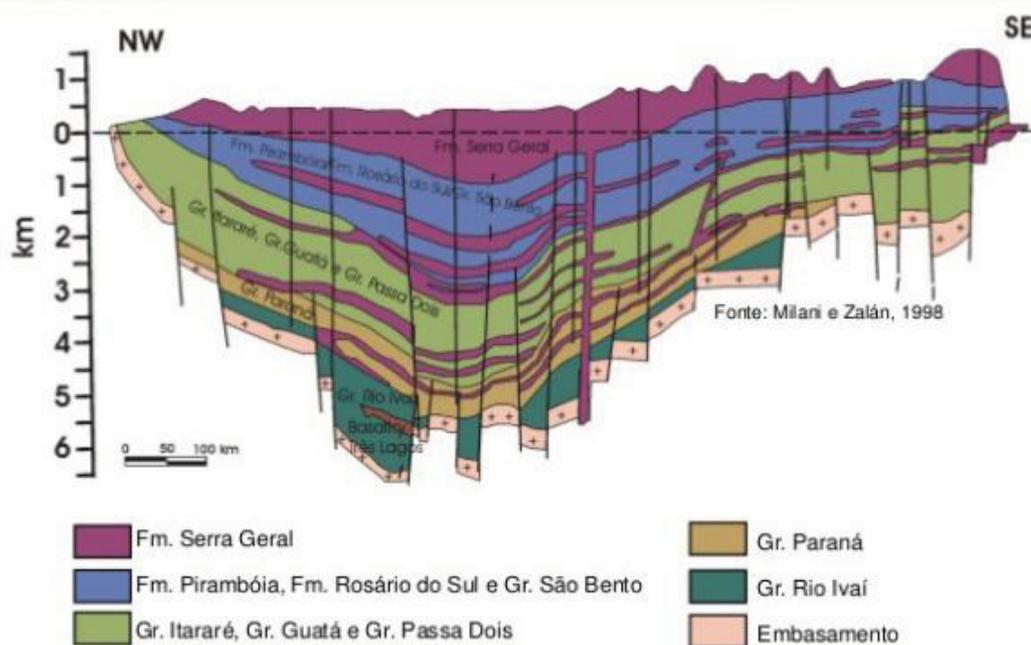
Simultaneamente aos derrames, continuaram ativos os processos sedimentares que são os responsáveis pela presença de sedimentos de origem provavelmente eólica encontrados entre derrames.

Segundo o mapeamento geológico do Brasil realizado em 1996 pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), a geologia da região é

caracterizada por rochas basálticas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. São rochas efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços e amigdaloides, intercalados com arenitos e rochas vulcânicas ácidas, ambas atravessadas por diques e soleiras de diabásio.

Milani e Zalan (1998) propuseram uma seção geológica esquemática com a evolução tectonoestratigráfica da bacia do Paraná que ressalta a intercalação dos derrames da até então Formação Serra Geral, com os arenitos da Formação Botucatu (Figura 3.3).

FIGURA 3.3 - SEÇÃO ESQUEMÁTICA DE DIREÇÃO NW-SE REALÇANDO A INTERCALAÇÃO DOS LITOTIPOS DAS FORMAÇÕES SERRA GERAL E BOTUCATU



FONTE: MILANI E ZALAN (1998)

O contexto geológico de Pato Branco é relativamente simples, no município afloram preferencialmente os basaltos toleíticos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, intercalados com porções areníticas e raramente riolitos ou vulcânicas ácidas. Ocorrem ainda soleiras e diques de diabásio de direção SE-NW relacionados ao Arco de Ponta Grossa e com o vulcanismo continental toleítico da bacia do Paraná (TOMAZONI, 2003).

A presença de basaltos pode influenciar fortemente a constituição do relevo local, essa rocha apresenta comumente linhas de fraqueza verticais, ou disjunções

colunares, características do resfriamento. Esses planos verticais permitem a percolação de água e aceleram os processos de erosão e decomposição seletiva.

Os litotipos predominantes na área de estudo são os basaltos da Formação Serra Geral. Caracterizam-se por serem rochas de coloração cinza média a preta, com textura variando de fanerítica média a afanítica (TABALIPA, 2008).

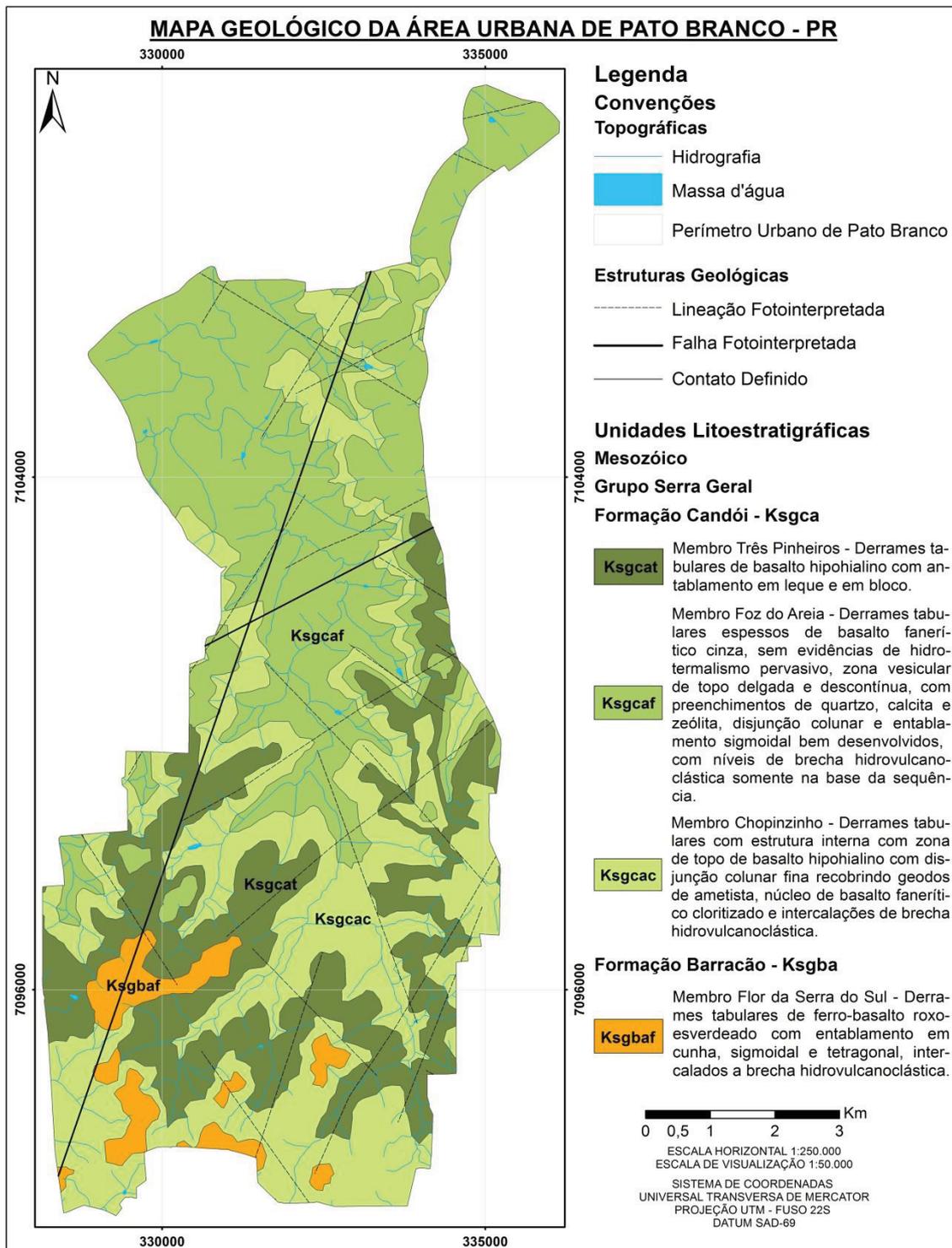
Em 2013 o Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR) publicou os primeiros dados do mapeamento detalhado do Grupo Serra Geral, que será incorporado ao novo mapeamento geológico do estado do Paraná. O projeto em parceria com a CPRM encontra-se em desenvolvimento e tem, dentre outros, o objetivo de redefinir a classificação litoestatigráfica do Grupo Serra Geral e subdividi-lo em várias formações e membros (ARIOLI *et al.*, 2013).

Arioli *et al.* (2013) caracterizaram a geologia da porção urbana de Pato Branco pela presença de duas formações geológicas e seus respectivos membros, Formação Barracão e Candói (Figura 3.4).

A Formação Barracão é constituída por basaltos de derrames lobados estratigraficamente espessos e regionalmente extensos, associados a abundantes intercalações de brechas vulcanoclásticas e sedimentos terrígenos. A Formação Candói é formada por derrames tabulares de basalto maciço de cor cinza a cinza-esverdeado, distingue-se da Formação Barracão pela menor abundância de lobos vesiculares, brechas hidrovulcanoclásticas e intercalações sedimentares, exceto na base do membro Foz da Areia.

A Formação Candói constitui 95,98% da área urbana municipal é representada pelos membros Três Pinheiros, Foz do Areia e Chopinzinho; já a Formação Barracão ocorre em 4,02% da área e é representada pelo membro Flor da Serra do Sul.

FIGURA 3.4 - MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA URBANIZADA DE PATO BRANCO



FONTE: Adaptado de ARIOLI *et al.* (2013)

Segundo Arioli *et al.* (2013), ambas as formações são compostas preferencialmente por basaltos toleíticos. Porém a Formação Candói é constituída por litotipos mais aptos à produção de brita e pedra de talhe, insumos para

recuperação de solo agrícola e gemas (ametista, quartzo, calcedônia, ágata, zeólita). Já a Formação Barracão é constituída por basaltos e rochas sedimentares porosas mais favoráveis à exploração de água subterrânea do que as demais formações do Grupo Serra Geral. Sobre esta última se desenvolveram os terrenos mais acidentados do Terceiro Planalto, pouco propícios ao desenvolvimento da agricultura.

3.3 FISIOGRAFIA

Pato Branco localiza-se no Terceiro Planalto Paranaense ou planalto do *Trapp* do Paraná, que se caracteriza pela grande uniformidade geológica derivada dos sucessivos derrames basálticos (TABALIPA, 2002). Pertence ao bloco das vertentes do planalto de Palmas, situadas ao sul do rio Iguaçu, e devido a sua estrutura e forma esse compartimento geomorfológico é considerado como a região fisiográfica menos complexa do estado (OKA-FIORI *et al.*, 2006).

3.3.1 Hidrografia

O sudoeste do Paraná é drenado pela bacia hidrográfica do rio Iguaçu, que é o maior complexo hidrográfico do estado. O rio Iguaçu possui inúmeros afluentes, dentre eles o rio Chopim. O alto e médio curso da bacia hidrográfica do rio Ligeiro é uma sub-bacia do rio Chopim, sendo balizada ao norte pelo arroio Gramado, afluente direto pela margem direita (SEMA, 2010).

Os rios localizados na área de estudos são classificados geneticamente como consequentes, aqueles cujo curso foi determinado pela declividade do terreno. O padrão da rede fluvial classifica a drenagem como dendrítica ou arborescente (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A bacia hidrográfica do Rio Ligeiro apresenta uma área de 44 km². Seu eixo maior disposto na direção N-S corta a área urbana de Pato Branco, sendo sua direção preferencial NNW-SSE. Comumente os acidentes urbanos registrados em

Pato Branco estão relacionados às encostas que margeiam o rio Ligeiro (TABALIPA, 2002).

O leito do Ligeiro apresenta largura média de 5 metros e é preenchido por uma lâmina d'água cuja espessura varia de poucos centímetros na nascente, atingindo cerca de 0,5 metros na foz (TABALIPA, 2008). Ao longo do curso do Ligeiro a mata ciliar encontra-se parcialmente removida. Pontualmente a água apresenta aspecto barrento devido ao processo erosivo formado a partir da retirada da mata. Na porção central da cidade o rio encontra-se parcialmente descaracterizado, canalizado e retificado, pontualmente seu curso foi desviado para galerias subterrâneas, e a planície de inundação encontra-se densamente povoada. Na foz do rio a mata ciliar encontra-se parcialmente preservada, como é possível visualizar na Figura 3.5.

FIGURA 3.5 - DETALHES DO RIO LIGEIRO EM DIFERENTES PONTOS DE SEU CURSO



FONTE: Modificado de TABALIPA (2008).

- LEGENDA: A) Nascente do rio, avançado processo degradacional.
 B) Ocupações irregulares com lançamento de dejetos diretamente na água.
 C) Aspectos de preservação da mata ciliar.
 D) Pontualmente edificações irregulares adentram o leito.
 E) Canalização e retificação do Ligeiro na região central.
 F) Foz do Ligeiro.

3.3.2 Clima

O município de Pato Branco apresenta bruscas mudanças climáticas, isso se deve a ação das massas de ar intertropicais quentes que atenuam o efeito das massas polares frias. De acordo com a classificação climática de Koppen, o clima da área de estudo é definido como sendo do tipo Cfb (C – mesotérmico; f – temperado úmido; b – verão brando com temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C°), conforme Figura 3.6.

FIGURA 3.6 - CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KOPPEN PARA O ESTADO DO PARANÁ



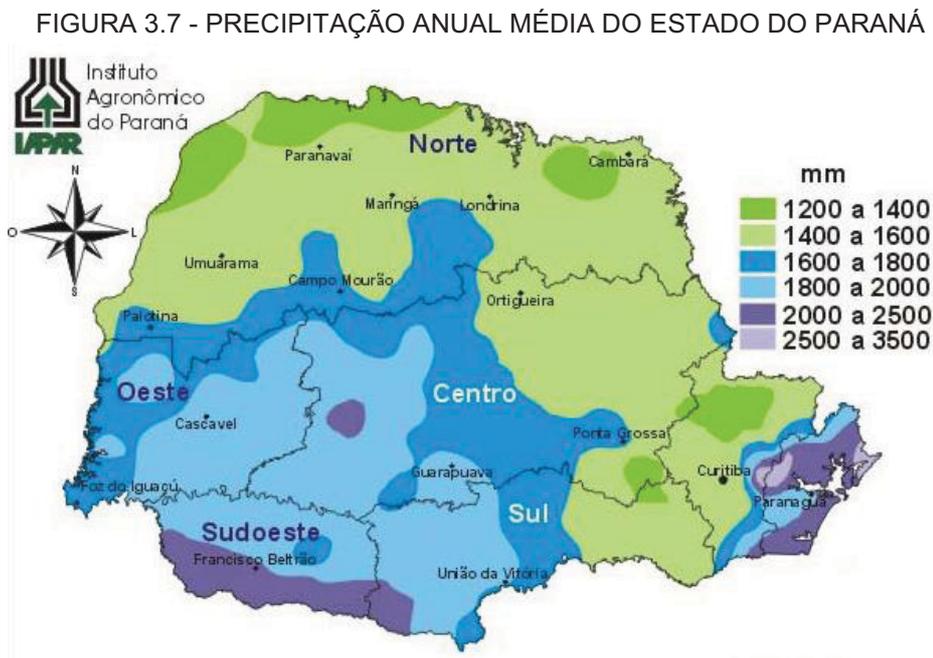
FONTE: IAPAR (2018)

Pato Branco encontra-se sob influência de um clima chuvoso, mesotérmico, úmido a superúmido sem estação seca, com verões frescos, e geadas severas frequentes no inverno (TABALIPA, 2008). Os meses que apresentam as temperaturas mais baixas são julho e agosto com índices que oscilam entre 6° e 8° C onde comumente a mínima registrada fica abaixo de 0° C. O mês mais quente do ano é janeiro onde a temperatura média fica na casa de 22° C.

Segundo Tabalipa (2002) o clima local é tipicamente subtropical úmido, com chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano, sem estação seca definida, mas com as quatro estações sensivelmente perceptíveis. Além disso, é influenciado pela

altitude moderada da região e também pela continentalidade devido a distancia do litoral.

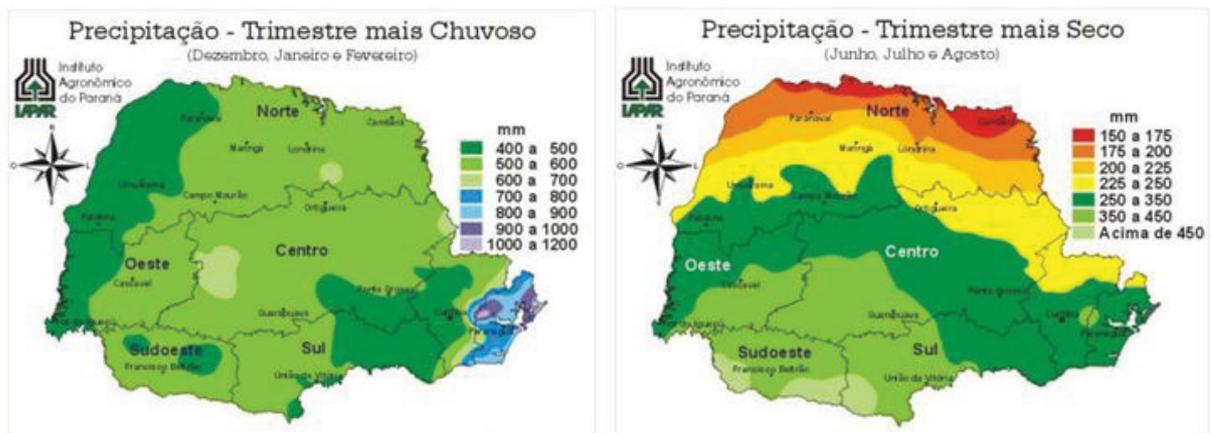
Segundo o levantamento de dados pluviométricos do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), a média de precipitação anual para o período de 1979 a 2005 na bacia foi de 2109,79 mm/ano, sendo outubro o mês mais chuvoso, e agosto o mês mais seco (TABALIPA, 2008). A análise realizada pelo autor, concluiu que ao longo desses anos o trimestre mais chuvoso – outubro, novembro, dezembro, apresentou 29,93% do total da precipitação anual, enquanto que o menos chuvoso – julho, agosto, setembro – concentrou 20,51% do total precipitado, o que demonstra que existe uma distribuição uniforme da precipitação durante o ano (Figuras 3.7 e 3.8).



FONTE: IAPAR (2018)

Para Fiori (1995), a precipitação é um importante fator no controle do ciclo hidrológico de uma determinada região, existindo um grande vínculo entre chuvas intensas e acidentes naturais, como escorregamentos, inundações, entre outros.

FIGURA 3.8 - VARIAÇÃO TRIMESTRAL DA PLUVIOSIDADE NO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: IAPAR (2018)

3.3.3 Geomorfologia

A geomorfologia condiciona a ocorrência de escorregamentos em função dos parâmetros morfométricos, com destaque para a declividade e orientação das vertentes.

Compreendido entre altitudes que variam de 600m (mínima) a 1000m (máxima), o município de Pato Branco apresenta relevo suave ondulado com vales em “V” abertos na porção leste e superfícies levemente aplainadas na porção oeste. As formas predominantes são topos alongados e vertentes convexas, moldadas nos derrames da Formação Serra Geral (OKA-FIORI *et al.*, 2006).

A topografia regional é de maneira geral uniforme, porém fortemente influenciada pela sucessão dos derrames basálticos que resultaram na configuração do relevo atual, como as mesetas e os patamares nas zonas de contato entre derrames. Localmente a região apresenta declividades elevadas ocasionadas pela ação constante da erosão fluvial, nesses pontos a inclinação das vertentes atinge de 25 a 50% (TABALIPA, 2002).

A porção urbanizada do município apresenta relevo marcado por uma homogeneidade morfológica decorrente do predomínio de feições planas a onduladas. Apresenta terrenos com declividade de 0 a 10% em mais de 65% da totalidade da área de estudo, sendo considerados aptos para uso agrícola (lavoura e pastagem). Nessa categoria incluem-se ainda as áreas inundáveis, com limitações

para o uso agrícola. O relevo do tipo ondulado com declividade de 10 a 20% ocorre em toda a área de estudo representando aproximadamente 30% da totalidade. Tais relevos são considerados suscetíveis a erosão, por essa razão são aptos apenas para a agricultura não mecanizada e reflorestamento.

Em aproximadamente 5% da área analisada o relevo é fortemente ondulado com comportamento relativamente acidentado e declividades superiores a 30%. Apresenta áreas inaptas para agricultura mecanizada e com restrições severas para agricultura não mecanizada, assim como restrições de uso para pecuária e reflorestamento e ocupação do solo (TABALIPA, 2002).

Localmente a área apresenta relevo do tipo escarpado, nesses pontos são evidenciadas as cabeceiras dos cursos formadores do rio Ligeiro, canais de primeira ordem com densidade hidrográfica alta e padrão de drenagem dendrítica a subparalela, sendo a maioria deles encaixados em vales em forma de “V” (TABALIPA, 2008).

Na porção central da bacia do rio Ligeiro estão às partes baixas das vertentes onde ocorrem os processos de acumulação de sedimentos oriundos das partes elevadas e transportados pelo rio ou por gravidade. Os solos mais espessos e desenvolvidos encontram-se geralmente sobre condições de declividade baixa, localmente podem atingir até 40% de inclinação.

A cobertura vegetal densa encontra-se preservada somente nas áreas de grande declividade, inaptas para ocupação humana. Os movimentos de massa registrados pela Defesa Civil do estado nos últimos 20 anos ocorreram em áreas vegetadas, de alta declividade com evidências de alteração devido à ação antrópica.

3.3.4 Pedologia

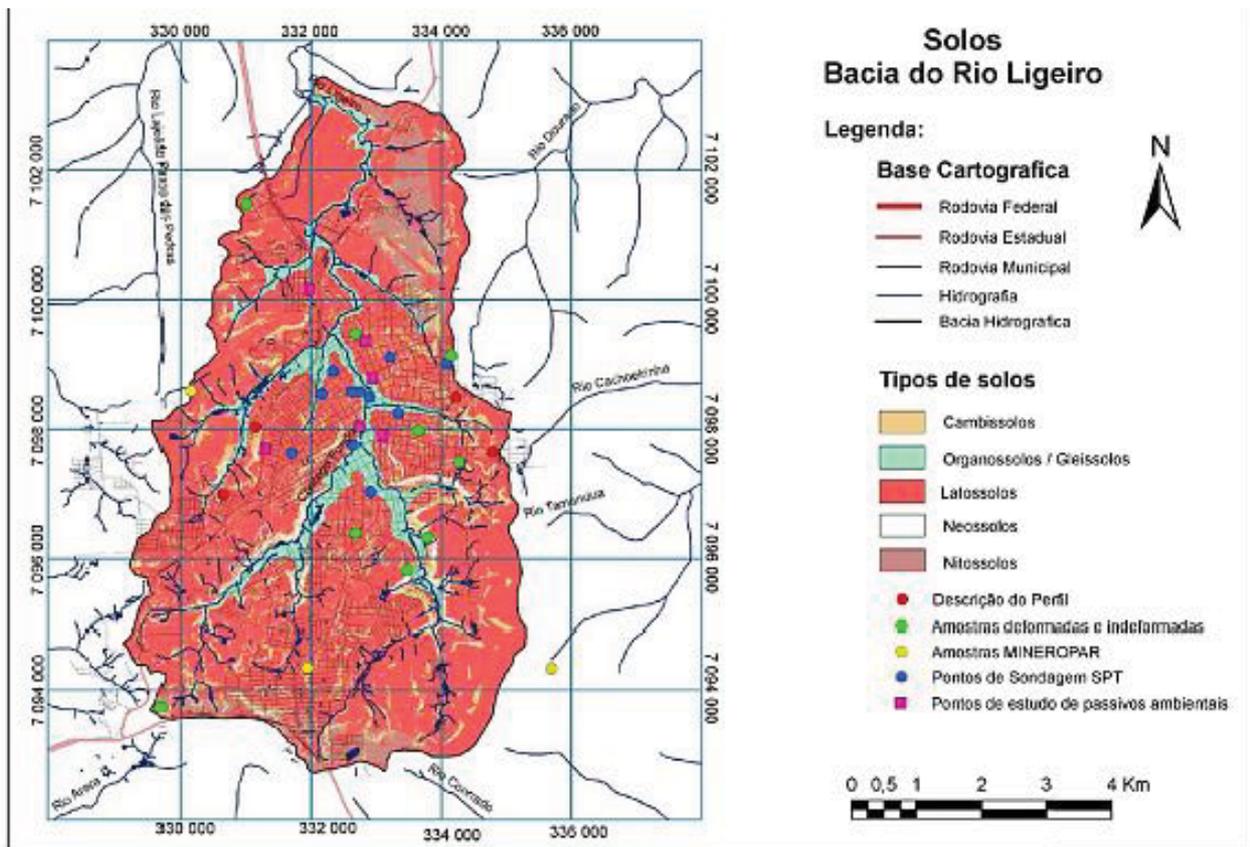
A pedogênese de Pato Branco é produto da alteração intempérica das rochas basálticas associada ao clima da região. De acordo com o estudo realizado por Tabalipa (2008), os solos mais profundos ocupam áreas de relevo aplainado e suave ondulado, enquanto as superfícies mais declivosas são ocupadas por solos rasos.

A caracterização e descrição dos solos aflorantes foram fundamentadas em dados dos levantamentos de reconhecimento dos solos do sudoeste do Paraná realizados pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) nos anos de 1974 e 1984, através do convênio SUDESUL – EMBRAPA – IAPAR e adaptados para a nova classificação da Embrapa de 1999. No relatório de 1984 a Embrapa catalogou os tipos de solos aflorantes em Pato Branco. De forma decrescente de abrangência foram descritos: latossolo (roxo álico) ocupando o relevo suave ondulado e ondulado; nitossolo (terra roxa estruturada) em relevo ondulado; cambissolo (distrófico) em relevo forte ondulado; neossolos (litólicos distróficos ou álicos) em relevo montanhoso, solos pouco profundos e muito suscetíveis à erosão; e gleissolos (depósitos aluvionares) em relevos planos (TABALIPA, 2008).

O mapa de caracterização dos solos da bacia do rio Ligeiro apresentado por Tabalipa (2008) abrange grande parte da área urbanizada do município. Possui escala compatível com essa pesquisa e apresenta correções importantes nas feições poligonais dos mapas existentes para a área, EMBRAPA (1974) com escala 1:300.000 e EMBRAPA (1984) em escala 1:600.000. Este foi desenvolvido a partir de dados de solos pré-existentes, e descrições complementares de perfis em campo, coleta de amostras e tratamentos laboratoriais realizados pelo autor (Figura 3.9).

Na Figura 3.9 é possível visualizar a distribuição dos pontos de pesquisa selecionados por Tabalipa (2008) e o tipo de análise realizado em cada um deles, sendo estas, descrições de perfis de solo, coleta de amostras deformadas e indeformadas, locação de furos de SPT e identificação das amostras cedidas pela MINEROPAR e pontos de estudos referentes a passivos ambientais.

FIGURA 3.9 - MAPA DE SOLOS DA BACIA DO RIO LIGEIRO



FONTE: TABALIPA (2008)

Baseado no levantamento de solos do perímetro urbano de Pato Branco realizado por Tabalipa (2008) foi possível estimar a cobertura de solos da área de estudo desta pesquisa (Tabela 1). Sendo esta composta preferencialmente por latossolos e cambissolos, totalizando 82,18% da superfície analisada.

TABELA 1 - ABRANGÊNCIA DOS SOLOS AFLORANTES NA ÁREA DE ESTUDO

TIPO DE SOLO	AREA (M ²)	ABRANGÊNCIA (%)
Neossolo	1,98	2,59
Cambissolo	10,08	13,18
Latossolo	52,76	69,00
Gleissolo	7,19	9,40
Nitossolo	4,45	5,82
	76,46	100,00

FONTE: Modificado de TABALIPA (2008)

3.3.4.1 Latossolos

Os latossolos representam 69% dos solos encontrados na área de estudo. São solos caracterizados por sua formação a partir de rochas eruptivas básicas, com horizonte B latossólico e não hidromórficos. Apresentam coloração vermelho escuro, mais profundos e friáveis, porosos e acentuadamente drenados. Têm sequência de horizontes A, B e C com baixa diferenciação de horizontes e transições, usualmente difusas ou graduais. A textura dos horizontes A e B é muito argilosa, ocasionando um baixo gradiente textural (CARDOSO *et al.*, 1984).

Os latossolos possuem um avançado estágio de intemperização, são solos muito evoluídos devido as efusivas transformações dos materiais constitutivos, exceto minerais pouco alteráveis. São solos espessos e muito profundos, normalmente ultrapassam 2 metros de profundidade, não raros os perfis com mais de 5 metros.

Ocupam frequentemente superfícies de declive suave, comumente entre 2 e 8%, tornando-se propícios a uma intensa mecanização. Ainda que pouco frequentes ocorrem latossolos em relevos com declives entre 8 e 15%, sendo raras as ocorrências em declividades superiores a 15%.

3.3.4.2 Cambissolos

Os cambissolos representam 13,18% dos solos encontrados na área de estudo. São solos minerais não hidromórficos com horizontes B câmbico raso, subjacentes a qualquer tipo de horizonte superficial. São pouco desenvolvidos com pedogênese pouco avançada e evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, ausência da estrutura da rocha, cromas mais fortes, conteúdo de argila mais elevado que os horizontes subjacentes (CARDOSO *et al.*, 1984).

São solos altamente heterogêneos quanto ao material de origem por essa razão suas características variam muito de um local para outro. A classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, entre outros.

A topografia acidentada e ou o material de origem bastante resistente ao intemperismo, ou as superfícies geomórficas jovens, provavelmente sejam responsáveis pelos perfis pouco evoluídos desta classe, pois o tempo de atuação dos processos pedogenéticos não foi suficiente para a intemperização mais profunda do solo, o que explica a presença de minerais primários menos resistentes ao intemperismo nas frações areia grossa e fina e os altos teores de silte nos perfis (TABALIPA, 2008).

Embora apresentem características físicas estáveis, tais como as relacionadas à porosidade, permeabilidade, drenagem e flocculação das argilas, esses solos são bastante suscetíveis a problemas geotécnicos especialmente nas áreas de topografia acidentada (CARDOSO *et al.*, 1984).

Na área de estudo são solos rasos, normalmente não ultrapassam 1 metro de profundidade, associados a um substrato de basalto. Ocupam superfícies de declive acentuado ou relevo montanhoso de vertentes íngremes com declividades superiores a 20%, áreas sujeitas à erosão (TABALIPA, 2008).

A vegetação da área é representada por capões isolados em encostas íngremes e em porções de matas de galerias fluviais, constituída predominantemente por maciços de bracatinga com aspecto perenifólio, totalizando 3,43% da cobertura original do município.

4. ESTADO DA ARTE

4.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Gerscovich (2012) movimento de massa é “qualquer deslocamento de um determinado volume de solo”. Em geral, a literatura trata os movimentos de massa como processos associados a problemas de instabilidade de taludes.

Augusto Filho e Virgilli (1998) definem taludes ou encostas naturais como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solo e rocha), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos, que apresentam ou não, modificações antrópicas, tais como cortes, desmatamentos, introdução de carga, entre outros. O termo encosta é mais empregado em estudos de caráter regional. Talude de corte é entendido como um talude originado de escavações antrópicas diversas. Talude artificial refere-se ao declive de aterros construídos a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens.

Os taludes são geralmente constituídos por solo residual e ou coluvionar, e rocha. Os solos residuais são aqueles provenientes da decomposição das rochas *in situ*, já os coluvionares são solos transportados pela ação da gravidade. Em relação à forma, os taludes podem possuir superfície plana ou curvilínea (côncava ou convexa), que determinam a direção do fluxo de água superficial (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

De maneira geral, as classificações modernas de movimentos de massa são baseadas na combinação de critérios de velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos, natureza do material instabilizado (solo, rocha, detritos, lama), sua textura, estrutura, conteúdo d'água, geometria das massas movimentadas e modalidade de deformação do movimento (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

A importância das classificações, sob o ponto de vista da aplicação, corresponde à possibilidade de se associar cada tipo de movimento de encosta a um conjunto de características (profundidade, raio de alcance, material instabilizado, potencial destrutivo, etc.). Tais características, em conjunto com o entendimento dos condicionantes, permitem formular modelos fundamentais para orientar a proposição de medidas preventivas e corretivas.

A complexidade envolvida no fenômeno e as diversas possibilidades de associação para análise deste resultou em diversas propostas de sistemas de classificação de movimentos de massa (VARNES (1978), FREIRE (1965), GUIDICINI e NIEBLE (1983), WOLLE (1988); AUGUSTO FILHO (1994), e SANTOS 2004).

A classificação proposta por Varnes (1978) é a mais utilizada internacionalmente e adotada pelo *International Association of Engineering Geology* (IAEG). Os critérios de classificação utilizados pelo autor incluem: velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos; natureza do material instabilizado; textura, estrutura e conteúdo d'água dos depósitos; geometria das massas movimentadas e a modalidade de deformação do movimento. Para este autor, os movimentos podem ser subdivididos em queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamento (corrida e rastejo) e complexo, e é aplicável tanto para solo como para rocha (Tabela 2).

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCHA	SOLO	
				GROSSEIRO	FINO
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamentos	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rochas De blocos rochosos	Abatimento de detritos De blocos de detritos	Abatimento de terra De blocos de detritos
	Translacional	Muitas unidades	De rocha	De detritos	De terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos Rastejo de solos	De terra
Complexos			Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

FONTE: VARNES (1978)

Há de se ressaltar que a maioria das classificações tem aplicabilidade regional e se baseia nas condições geológicas e climáticas locais. Há algumas propostas para adequar a classificação dos movimentos de massa a ambientes tropicais, é como o caso do Brasil dentre elas, FREIRE (1965), VARGAS (1999), e COSTA NUNES (1969). Augusto Filho (1994) revisou a proposta de classificação de

Vargas e ajustou as características dos principais grandes grupos de processos de escorregamento à dinâmica ambiental brasileira.

Freire (1965) classificou de forma sintética os movimentos de solo e rocha em três tipos fundamentais: escoamentos, escorregamentos e subsidências. Para Freire os escoamentos correspondem às deformações ou movimentos contínuos, com ou sem superfície de ruptura definida, sendo os movimentos classificados em dois tipos: corridas e rastejos. Os escorregamentos correspondem a um deslocamento finito, além de superfície nítida de ruptura, sendo classificados também em dois tipos: rotacionais e translacionais. As subsidências correspondem a um deslocamento finito ou deformação contínua, de direção vertical, sendo classificadas em três tipos: subsidências propriamente ditas, recalques e desabamentos.

Vargas (1999) em estudos na Serra do Mar classificou os movimentos de massa observados em:

- Rastejo (*creep*) – movimento lento de camadas superficiais de solo, encosta abaixo, com velocidades muito pequenas, de alguns milímetros por ano. Acelerado por ocasião das chuvas e desacelerado em épocas secas;
- Escorregamentos verdadeiros – deslizamentos de volumes de solos ao longo de superfícies de ruptura bem definidas, cilíndricas ou planares. São os únicos movimentos que podem ser submetidos a análise estática, do tipo de equilíbrio-limite;
- Deslizamento de tálus – os tálus, detritos de escorregamentos antigos, encontram-se em geral saturados e podem sofrer deslizamentos, sob a ação conjunta da gravidade e das pressões neutras. A massa de material escoia como se fosse um fluido ou líquido viscoso, sem a existência de uma linha de ruptura bem definida.
- Deslocamentos de blocos de rochas – em algumas encostas naturais ocorrem blocos ou lascas de rochas intactos, resistentes ao intemperismo, que podem sofrer queda livre por ocasião de chuvas intensas e prolongadas, provocam erosão e solapamento do material junto as suas bases.

- **Avalanche ou fluxo de detritos (debrisflows)** – são fenômenos classificados como desastres naturais, pelo seu alto poder destrutivo e pelos danos que podem provocar. São movimentos de massa que se desenvolvem em períodos muito curtos e ocorrem em geral, após longos períodos de chuva.

Wolle (1988) divide os processos em instabilização em classes e subclasses, conforme Tabela 3.

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS
PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS

CLASSES	SUBCLASSES	
Escorregamentos	Escorregamentos translacionais (planares)	Provocados pela elevação de um nível de água pré-existente
		Provocados pela infiltração, sem nível d'água
	Escorregamentos rotacionais	Escorregamentos provocados por desconfinamento
Escorregamento em rochas e saprolitos	Quedas de blocos	
	Rolamento de matacões	
	Deslizamento de blocos e lascas	
	Escorregamentos estruturados	Em rocha fraturada Em saprólitos
Escoamentos lentos e muito lentos	Rastejo de massas de tálus (colúvio)	
	Rastejo em solo superficial nas encostas	
	Rastejo profundo em rochas	

FONTE: WOLLE (1988)

Augusto Filho (1994) apresentou uma classificação genérica que resume os principais grupos de processos de instabilização de vertentes pesquisados para a elaboração de Cartas de Risco de Escorregamento no Brasil. Nessa sistemática os escorregamentos são definidos em função da forma e do tamanho do processo, bem como o tipo de material (solo e/ou rocha) mobilizado. Tais processos atuam essencialmente nas áreas de encostas com alta declividade, nas montanhas, serras e escarpas.

Essa classificação apresenta os processos agrupados em quatro classes: rastejo, escorregamentos, quedas e corridas (Tabela 4).

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS GRANDES GRUPOS DE PROCESSOS DE ESCORREGAMENTO

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO/MATERIAL/GEOMETRIA
Rastejos	Vários planos de deslocamento (internos)
	Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas, e decrescentes com a profundidade
	Solos, depósitos, rocha alterada/fraturada
	Geometria indefinida
Escorregamentos	Poucos planos de deslocamentos (externo)
	Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)
	Pequenos e grandes volumes de material
	Geometria e materiais variáveis
	Translacionais ou planares: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza
	Rotacionais ou circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas
Quedas	Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
	Sem plano de deslocamento
	Movimentos tipo queda livre ou plano inclinado
	Velocidades muito altas (vários m/s)
	Material rochoso
	Pequenos e médios volumes
	Geometria variável
Rolamento de matacão - tombamento	
Corridas	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimento)
	Movimento semelhante a um líquido viscoso
	Desenvolvimento ao longo das drenagens
	Velocidade média a altas
	Mobilização de solo, rocha, detritos e água
	Grandes volumes de material
Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas	

FONTE: AUGUSTO FILHO (1994)

Santos¹ (2004) apud Chaves (2016), observando o grande número de movimentos de massa desenvolvidos na Serra do Mar identificou padrões nos eventos quanto ao modo de desenvolvimento do movimento de massa e comparou este, com suas causas desencadeadoras. O autor subdividiu as ocorrências em dois

¹ SANTOS, A. R. A grande barreira da Serra do Mar: Trilha dos imigrantes. O Nome da Rosa, São Paulo, SP, p. 39-45, 2004.

grandes grupos: naturais e induzidos. A partir destes, estabeleceu uma nomenclatura em função da velocidade e tipo de movimento, conforme Tabela 5.

TABELA 5 - PADRÕES DOS MOVIMENTOS DE MASSA SEGUNDO SANTOS (2004)

	TIPOS	CARACTERÍSTICAS
Naturais	Rastejo	Movimentos de grande lentidão e intermitência no horizonte superior de solos superficiais
	Escorregamentos translacionais rasos ou planares	Desmonte hidráulico de solos superficiais, especialmente associado a encostas retilíneas com inclinação acima de 30° e rupturas positivas de declive
	Corrida de lama	Violenta torrente fluida de massa de solo e rocha ao longo dos talwegues de vales encaixados, originada da confluência do material de inúmeros escorregamentos planares ocorrido nas vertentes desses vales
	Movimentação de talus e corpos coluvionares	Movimentação de grandes massas coluvionares, quando cortadas ou sobrecarregadas por algum tipo de intervenção humana
Induzidos	Escorregamentos rotacionais profundos	Escorregamentos de grandes massas de solo, devidos especialmente a escavações de pé de talude, sobrepeso, alterações de drenagem, desmatamento, etc.
	Escorregamentos translacionais rasos ou planares	Por cortes no terreno, concentração de águas superficiais, desmatamento, sobrepesos de aterros ou lixos, etc.

FONTE: CHAVES (2016)

Dentre os movimentos de massa descritos pela literatura, os principais eventos associados a taludes ou encostas naturais são escoamentos e escorregamentos. Estes são amplamente conceituados, sendo suas principais características apresentadas na Tabela 6.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA EM ENCOSTAS

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO
Escoamento	São caracterizados como movimentos contínuos, com ou sem superfícies de deslocamento definida, não associados a uma velocidade específica.
	O mecanismo de deformação é semelhante à movimentação de um fluido viscoso. Nesse contexto, a velocidade dos movimentos de massa pode ser considerada como característica destes eventos.
	Quando o movimento é lento, dá-se o nome de rastejo, e a velocidade é medida em centímetros por ano.
	Quando o movimento é rápido (velocidade ≥ 10 km/h) denomina-se corrida. Nestes casos há perda completa da resistência do solo e a massa de solo se comporta como um fluido, atingindo grandes extensões durante o deslocamento.
Escorregamento	São movimentos de massa de duração relativamente curta e com superfície de ruptura bem definida.
	A deflagração do movimento ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam à resistência ao cisalhamento do solo.
	A ruptura ocorre a partir da formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa contínua de solo.

FONTE: CHAVES (2016)

4.1.1 Escorregamentos

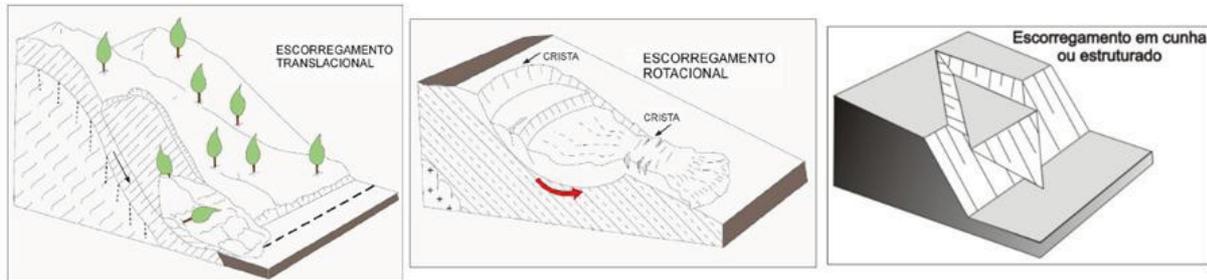
Escorregamentos são movimentos rápidos (m/h a m/s), de duração relativamente curta, com planos de ruptura bem definido, onde a massa deslocada lança seu centro de gravidade para fora do talude (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

O processo se desencadeia pela combinação de um conjunto de fatores que contribuem na instabilização de encostas, dentre eles: declividades elevadas, altos índices de pluviosidade, presença ou ausência de vegetação e ação antrópica.

Em razão da massa transportada e da geometria do plano de ruptura, os escorregamentos são classificados em três tipos: translacional ou planar, rotacional ou circular e estruturado ou em cunha (Figura 4.1).

Para Guidicini e Nieble (1983) são muitas as causas ou agentes que conduzem ao aparecimento de escorregamentos, entretanto para que ocorra um escorregamento é necessário que a relação entre a resistência média ao cisalhamento do solo ou da rocha e as tensões médias de cisalhamento na superfície potencial de movimentação tenha decrescido, de um valor maior que a unidade ($> 1,00$) até 1,00 quando é atingido o ponto de ruptura.

FIGURA 4.1 - MODELOS ESQUEMÁTICOS DE ESCORREGAMENTOS



FONTE: Modificado de INFANTI JR e FORNASARI FILHO (1998)

A velocidade máxima do movimento depende da inclinação da superfície de escorregamento, da causa inicial de movimentação e da natureza do terreno (TABALIPA, 2008).

O mecanismo de deformação envolvido nestes processos apresenta um regime diferente de rastejo, ocorrendo por aumento das tensões atuantes ou queda da resistência, em períodos relativamente curtos, ou combinações destes mecanismos que levam os terrenos, que constituem os taludes e encostas naturais, a rupturas por cisalhamento.

Um dos objetivos deste trabalho é a classificação da área urbanizada do município de Pato Branco quanto à suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo, por esta razão vale conceituar mais profundamente esse tipo de movimento de massa.

Os escorregamentos translacionais de solo são processos comumente observados nas encostas serranas brasileiras, envolvendo solos superficiais, frequentemente até o contato com a rocha sotoposta, alterada ou não. Também ocorrem em taludes, mobilizando solo, saprolitos e rochas, sendo condicionados por estruturas planares desfavoráveis à estabilidade, relacionados a feições geológicas diversas, tais como: foliação, xistosidade, fratura, falha, acamamento, mineralogia, etc. (INFANTI JR e FORNASARI FILHO, 1998).

Segundo Guidicini e Nieble (1983) se massas de solos ou rochas possuírem anisotropias acentuadas em seu interior, eventuais escorregamentos que nelas ocorram irão provavelmente apresentar plano de movimentação condicionado a tais anisotropias. Estes movimentos podem ocorrer em taludes menos inclinados e

extensos, diferentemente dos escorregamentos rotacionais que surgem em taludes íngremes e possuem extensão relativamente limitada.

Em terreno as feições que marcam o início de um escorregamento se configuram em linhas ou fendas localizadas no topo da área sujeita a movimentação. Os escorregamentos ocorrem ao longo de superfícies planas, em geral preexistentes, e são relacionados a planos de fraqueza do sistema (Figura 4.2). Geralmente ocorrem dentro do manto de alteração, cuja espessura está condicionada a natureza da rocha, condições climáticas locais, tipo de drenagem e inclinação da encosta. Como o manto de alteração brasileira pode atingir espessuras muito elevadas, torna mais raro o afloramento de rochas em encostas com inclinação inferior a 40° (PICHLER², 1957, apud TABALIPA, 2008).

FIGURA 4.2 - MODELOS ESQUEMÁTICOS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO



FONTE: Modificado de NOWATZKI (2018)

Para Augusto Filho (1994) os escorregamentos translacionais surgem geralmente em encostas com elevada declividade e em solos pouco desenvolvidos, e estão associados a períodos de pluviosidade intensa ou de longa duração que saturam as camadas de solo, deflagrando a desagregação e o transporte do mesmo.

Para Fernandes e Amaral (1996) são movimentos extensos e rasos, sendo o plano de ruptura localizado entre 0,5 e 5,0m de profundidade. Para os autores as rupturas tendem a ocorrer rapidamente devido ao aumento da poropressão positiva durante os eventos pluviométricos.

² PICHLER, E. Aspectos geológicos dos escorregamentos de Santos. Boletim da sociedade brasileira de geologia, São Paulo, SP, p. 69-77, 1957.

4.1.2 Agentes Desencadeadores e Variáveis Condicionantes de Movimentos de Massa

A deflagração de movimentos de massa de maneira geral é controlada por uma cadeia de eventos, muitas vezes de caráter cíclico, com origem na formação da própria rocha e sua evolução geológica e geomorfológica subsequente, como tectônica ativa, intemperismo, erosão, ação antrópica, entre outros. (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

Os taludes naturais são suscetíveis a problemas de instabilidade devido às forças gravitacionais que contribuem para a deflagração do movimento. Além disso, a evolução pedogenética da encosta influencia na estabilidade do sistema visto que com o avanço dos processos físico-químicos o material resultante torna-se menos resistente e, dependendo da influência da topografia, geram-se condições propícias para deflagrar a ruptura.

Por outro lado, a análise da correlação entre agente e causa é importante para a compreensão dos movimentos de massa. O aporte de água no sistema influencia na estabilidade de diversas formas, por exemplo, no umedecimento do solo, que configura um aumento das cargas atuantes, ou no aumento da poropressão, que resulta na redução da resistência ao cisalhamento, entre outros.

Segundo Guidicini e Nieble (1983), os agentes podem ser divididos conceitualmente de duas maneiras: os predisponentes e os efetivos. Os agentes predisponentes referem-se ao conjunto de características intrínsecas onde o movimento de massa ocorre em função apenas das condições naturais, e estes se subdividem em:

- Complexo Geológico: tipo de rocha, estrutura da rocha, estado de alteração, acamamento, fraturas, etc;
- Complexo Geomorfológico: declividade, forma da encosta, comprimento das vertentes, orientação, etc;
- Complexo Hidrológico: clima, volume e intensidade das precipitações, dinâmica da água no solo, etc;
- Gravidade;
- Calor solar;

- Tipo de vegetação original.

Já os agentes efetivos referem-se ao conjunto de elementos diretamente responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa, dentre eles a influência antrópica. Esses podem ainda subdividir-se em razão de sua maneira de atuação em efetivos preparatórios, que aceleram o processo de instabilidade, ou efetivos imediatos, que desencadeiam o evento de forma imediata. Devido a intensidade com que esses agentes atuam, alguns podem ser inseridos em ambos os grupos:

- Efetivos preparatórios: pluviosidade, erosão pela água ou pelo vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, ação humana, desflorestamento e etc;
- Efetivos imediatos: chuva intensa, degelo e neve, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem e etc;

Quanto às causas, Terzagui³ (1950, apud Guidicine e Nieble, 1983) citando, classificou os condicionantes segundo a posição ocupada no talude da seguinte maneira:

- Causas internas: são as que levam a ruptura sem a constatação de qualquer alteração geométrica do talude e que ocasionam perda de resistência interna do material (aumento da pressão hidrostática, diminuição da resistência - coesão e do ângulo de atrito interno).
- Causas externas: provocam um aumento das tensões de cisalhamento sem que haja diminuição da resistência do material (aumento da inclinação do talude por processos naturais ou artificiais, decomposição do material na parte superior do talude, abalos sísmicos e vibrações).
- Causas intermediárias: resultam de efeitos causados por agentes externos no interior do talude (liquefação espontânea, rebaixamento rápido do freático, erosão retrogressiva).

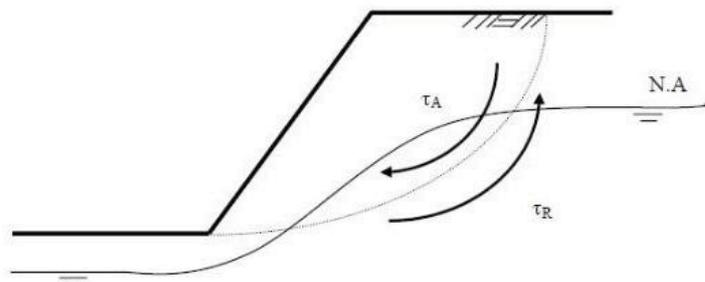
Augusto Filho e Virgili (1998) defendem que os principais condicionantes e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira, são:

³ TERZAGHI, K. Mechanism of Landslides. In: S. Paige (Editor), Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume). Geological Society of America, Washington, D. C., p. 83-123, 1950.

- Características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas;
- Características geomorfológicas, com destaque para a inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas;
- Regime das águas de superfície e subsuperfície;
- Características de uso do solo e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e servida, etc.

A instabilidade do talude é deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas na massa do solo atingem a resistência ao cisalhamento do material, ao longo de uma superfície contínua. A condição de Fator de Segurança (FS) igual a 1,00, que ocorre quando as tensões resistentes se igualam às tensões atuantes (Figura 4.3), pode existir por aumento das tensões cisalhantes mobilizadas ou redução da resistência ao cisalhamento. Desta forma, os fatores deflagradores dos movimentos de massa podem ser separados em dois grupos, aumento da sollicitação e redução da resistência, como mostra a Tabela 7.

FIGURA 4.3 - MECANISMOS QUE LEVAM A RUPTURA DE UM VERTENTE



FONTE: GERSCOVICH (2012)

Vale ressaltar que as variáveis relacionadas aos processos de instabilização de encostas atuam de forma integrada e, portanto, não devem ser analisadas isoladamente.

TABELA 7 - CLASSIFICAÇÃO DOS FATORES DEFLAGRADORES DOS MOVIMENTOS DE MASSA

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS GEOLÓGICOS/ANTRÓPICOS
Aumento da solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão
		Escorregamentos
	Sobrecarga	Cortes
		Peso da água, neve, granizo, etc.
		Acúmulo natural de material (depósito)
		Peso da vegetação
		Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc.
		Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Águas em trincas
Congelamento		
Material expansivo		
Redução da resistência ao cisalhamento	Características inerentes ao material (geometria, estrutura, etc.)	Características geomecânicas do material
		Ação do intemperismo provocando alterações físico-químicas nos minerais originais, causando quebra das ligações e gerando novos minerais com menor resistência
	Mudanças ou fatores variáveis	Processos de deformação em decorrência de variações cíclicas de umedecimento e secagem, reduzindo a resistência.
		Variação das poropressões
		Elevação do lençol freático por mudanças no padrão natural de fluxo (construção de reservatórios, processos de urbanização)
		Infiltração da água em meios não saturados, causando redução das pressões de águas negativas (sucção)
		Geração de excesso de poropressão, como resultado de implantação de obras
		Fluxo preferencial através de trincas ou juntas, acelerando os processos de infiltração

FONTE: VARNES (1978)

4.1.2.1 Geologia

Qualquer estudo que contemple o ambiente e suas características naturais depende da exploração das características geológicas da área. É de fundamental importância à caracterização da litologia local, seu grau de alteração e resistência

mecânica das rochas. A alteração das rochas é diretamente proporcional a suscetibilidade natural de ocorrência de movimentos de massa, já a resistência da rocha relaciona-se não só a alteração mas também ao tipo litológico em questão (RODRIGUES⁴, 2002, apud TABALIPA, 2008).

Sendo a litologia a fonte primária da pedogênese, a geologia esta presente nas características intrínsecas dos solos (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria, porosidade, entre outras).

As características estruturais que representam os pontos de menor resistência e descontinuidade desempenham papel fundamental na infiltração e circulação da água, e, conseqüentemente atuam como caminhos preferenciais de alteração (FIORI, 1995). No processo de instabilização de vertentes os principais fatores condicionantes estão vinculados ao tipo de rocha e as características estruturais, tais como falhas, fraturas, foliações e inclinação das camadas (TABALIPA, 2008).

4.1.2.2 Pedologia

A origem e evolução dos solos ocorrem devido à ação conjunta de uma série de fatores, dentre eles: a influência do clima (chuva e temperatura), materiais de origem, organismos vegetais e animais, relevo e tempo (SALOMÃO e ANTUNES, 1998). Sendo os aspectos mais importantes para o desenvolvimento pedológico à temperatura e a precipitação pluviométrica.

Em regiões tropicais os processos de laterização podem induzir à formação de macroestruturas e características particulares dos solos, quanto aos parâmetros de resistência, índice de plasticidade, permeabilidade, textura, e outras características que estão diretamente relacionadas aos mecanismos de escorregamentos e processos correlatos.

⁴ RODRIGUES, B.B. Proposta de sistemática para tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais: aplicação em Ouro Preto (MG). Tese de Doutorado. Escola Estadual Paulista – Instituto de Geociências e ciências exatas – Campos Rio Claro, SP, 2002.

A geotecnia de solos vem se intensificando dentro da Geologia de Engenharia, inclusive no campo da estabilidade de taludes e encostas (WOLLE, 1985).

Para Fiori (1995) o arranjo espacial das partículas no solo, que corresponde à sua estrutura, influencia no direcionamento e na velocidade de infiltração da água, além de interferir na atuação da força de atrito nas camadas detríticas.

A porosidade e a permeabilidade são inversamente proporcionais à densidade, que representa a relação entre o volume e a massa total do solo (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

Em termos específicos de escorregamentos, a condutividade hidráulica assume importância na recarga de água superficial (velocidade e infiltração) e na geração de descontinuidades hidráulicas no interior do perfil de alteração, que podem atuar localmente como camadas de impedimento ao fluxo vertical, favorecendo, conseqüentemente a geração de elevadas poropressões positivas (FERNANDES *et al.*, 2001). Já para Kozciak (2005) a diminuição brusca da condutibilidade hidráulica favorece a geração de fluxos subperficiais, com forte componente lateral, diminuindo a resistência ao cisalhamento nas zonas de contato, e aumento consecutivamente o peso específico do solo, favorecendo o deslocamento da massa pela ação da gravidade.

Quanto à resistência dos solos, vale destacar a importância dos parâmetros coesão e ângulo de atrito interno. A coesão é a força exercida entre as partículas que como resultado das atrações intermoleculares (força de Van Der Waals) que agem nos pontos de mais próximos do contato e das repulsões eletrostáticas dos íons dispersos na dupla camada que envolve as partículas coloidais. O atrito interno é o ângulo máximo que um determinado material pode assumir sem que haja rompimento de seu estado inercial. Sob a denominação genérica de atrito interno de um solo, inclui-se além do atrito físico entre as partículas o atrito fictício proveniente do entrosamento entre partículas (BARATA, 1994).

Quanto aos índices físicos, são propriedades e parâmetros dos solos que influenciam direta e indiretamente suas suscetibilidades aos movimentos de massa e ao tipo de mecanismo de instabilização atuante. Entre eles destacam-se: peso específico (natural, seco, saturado, submerso), porosidade, índice de vazios,

plasticidade, permeabilidade, compressibilidade, granulometria, mineralogia, atividade, entre outros.

A identificação do estado do solo considerando os índices físicos acima citados se dá facilmente através de ensaios laboratoriais.

4.1.2.3 Geomorfologia

As características geomorfológicas (forma e dinâmica do relevo) associadas a características geotécnicas e geológicas do meio físico são os principais fatores, que para um determinado tipo climático, condicionam os reflexos decorrentes da ocupação dos solos.

As formas de relevo de uma determinada área são influenciadas pelo processo de ocupação local e comumente sofrem bruscas alterações em ambiente urbano, condicionando grande parte dos problemas do ambiente (PRANDINI *et al.*, 1995).

Para Kozciak (2005), os atributos de relevo associados principalmente com a morfologia e morfometria, interferem diretamente nas atividades erosivas, e são, geralmente obtidas por meio das formas das encostas, das diferenças de declividade dos terrenos, da orientação das encostas e da altimetria.

A declividade fornece a medida de inclinação da vertente em relação a horizontal. A inclinação da encosta contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura de solo (INFANTI JR e FORNASARI FILHO, 1988). Quanto maior a declividade maior será a componente vertical da gravidade, principal responsável pela tendência da água e do solo ou rocha de deslocarem dos pontos mais elevados aos mais baixos.

A declividade é um dos parâmetros geomorfológicos de suma importância nos processos de movimentos de massa, pois condiciona os cursos d'água e deslocamento do colúvio. A velocidade de deslocamento de material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade (KOZCIAK, 2005).

Encostas de elevada declividade são naturalmente consideradas suscetíveis a escorregamentos de solo, por essa razão esse atributo deve ser considerado em conjunto com os demais fatores condicionantes a eventos desse tipo.

Sidle *et al.*, (1985) apresentam uma associação de classes de declividade relacionadas a alguns tipos de movimentos de massa gravitacionais. Para o autor os movimentos gravitacionais se relacionam com a declividade da seguinte maneira: rastejos em solos são mais suscetíveis em encostas com declividades que variam de (1,3 a 25°); escoamentos rápidos em solos (4 a 20°); escorregamentos rotacionais (7 a 18°) e escorregamentos rápidos em solos e detritos sobrejacentes a rocha (>25°).

Com relação à forma das encostas, as seções côncavas por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, são as mais favoráveis à ocorrência de escorregamentos, já que a água se concentra tanto em superfície como em subsuperfície favorecendo a saturação dos horizontes pedológicos (FERNANDES *et al.*, 2001).

A orientação da encosta determina a exposição desta às variáveis climatológicas, como por exemplo, vento e insolação. Esta, afeta diretamente a resistência ao cisalhamento em virtude de estar intimamente relacionada à presença de umidade e cobertura vegetal, além da exposição direta das chuvas que são condicionadas à direção predominante dos ventos (DAI e LEE⁵, 2001, apud TABALIPA, 2008).

4.1.2.4 Cobertura Vegetal

Guidicini e Nieble (1983) afirmam que as florestas desempenham um papel importante na proteção do solo e que o desmatamento pode propiciar não somente o aparecimento da erosão, mas também de movimentos coletivos de solo.

⁵ DAI, F.C., LEE, C.F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing. Department of Civil and Structural Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, People's Republic of China. *Engineering Geology*. v. 59. p. 253-266, 2001.

Os mesmos autores acrescentam dentre outros pontos favoráveis a estabilidade de taludes que, o sistema radicular promove a estabilização das encostas, conferindo um acréscimo substancial de resistência ao cisalhamento, distribuindo na encosta as tensões originadas em pontos críticos e retirando parte da água destinada a infiltração no maciço.

A cobertura vegetal atua na redução da intensidade dos agentes climáticos no maciço natural, favorecendo a estabilidade das encostas e a proteção dos solos. As partes aéreas da vegetação atuam interceptando e protegendo o solo dos raios solares, ventos e chuva. Em relação a água da chuva, a vegetação age como um amortecedor ao impacto das gotas no solo, prevenindo contra a erosão e favorecendo a infiltração hídrica, além de proporcionar a retenção em diversos componentes do corpo vegetal e eliminação de parte desta água em forma de vapor, diminuindo portanto o volume de água que atinge o terreno e o escoamento superficial.

Para Tabalipa (2008), o desmatamento de uma encosta gera uma série de efeitos que reduzem o coeficiente de segurança dessa mesma encosta, além dos já citados pelos demais autores, pode ainda gerar uma elevação do lençol freático, como consequência da eliminação da atividade de evapotranspiração da cobertura vegetal, com possíveis reflexos no grau de saturação do solo superficial e aumento do peso.

Existem casos, porém em que a vegetação atua como facilitador do movimento de massa devido ao sobrepeso que acarreta a encosta. Vargas (1999) afirma que não há dúvidas de que a degradação da cobertura vegetal coincida com escorregamentos generalizados em encostas, assim como existem episódios de grandes escorregamentos deflagrados por chuvas violentas em regiões florestadas, onde os blocos mobilizados de solos carrearam enormes troncos de árvores e cobertura vegetal.

Kozciak (2005) afirma que a remoção da sobrecarga e consequente eliminação da ação dos ventos sobre a vegetação, aumentam de imediato a segurança de uma vertente. Mas passado um determinado tempo, ocorre novamente o incremento da instabilidade em virtude do apodrecimento do sistema radicular e da eliminação da redistribuição da água da chuva. O intervalo de tempo

decorrente dependerá do formato e densidade das raízes, tamanho, resistência a tração e tipo de vegetação.

Fiori e Borchardt (1997) concluíram que na Serra do Mar Paranaense o efeito da presença vegetação sobre a estabilidade das encostas é variável segundo a inclinação da vertente. Em vertentes pouco inclinadas a presença de vegetação atua de forma positiva, reduzindo gradativamente o efeito estabilizador conforme aumenta a declividade.

4.1.2.5 Ação Antrópica

A urbanização e suas consecutivas construções alteram o meio físico de uma região substituindo a vegetação nativa por selvas de concreto e asfalto, impermeabilizando o solo e forçando o escoamento superficial das águas da chuva. A vegetação como citado anteriormente, desempenha um papel de suma importância na defesa natural do solo e a retirada da cobertura vegetal pode iniciar processos de degradação como escorregamentos e erosão.

O crescimento populacional acelerado somado ao processo de ocupação do solo em terreno urbano tem demonstrado não obedecer a qualquer critério de planejamento ao que se refere aos recursos naturais e bem-estar da população. O planejamento urbano quando bem elaborado, deve considerar as limitações e potencialidades locais, isso inclui aspectos ambientais, administrativos, econômicos, sociais, físico-territoriais (MOTA, 1999).

A ocupação urbana sem a adequada consideração dos condicionantes geológico-geotécnicos e geomorfológicos da região, que caracterizem o meio físico, é um dos principais fatores responsáveis para ocorrência de acidentes geológicos urbanos, trazendo prejuízos à população e ao poder público.

A definição dos parâmetros geotécnicos de uma área permite a orientação para o uso correto do solo, além de permitir a identificação de áreas naturalmente suscetíveis aos movimentos gravitacionais de massa, enchentes, inundações, entre outros.

A maneira como o homem interage com o meio pode influenciar drasticamente na ocorrência de escorregamentos. O corte dos sopés de encostas, retaludamentos para implantação de rodovias, assim como o desmatamento desestabilizam os maciços e tornam os terrenos mais suscetíveis a esses eventos. A contenção e estabilização de uma encosta após a interação do homem se dá através de obras de engenharia, onde obrigatoriamente são apresentados os parâmetros geotécnicos da vertente.

Para Tabalipa (2008), as principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos são:

- Remoção da cobertura vegetal;
- Lançamento e concentração de águas servidas;
- Vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas;
- Execução de cortes com geometria inadequada (altura e inclinação);
- Execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação);
- Lançamento de entulho e lixo nas encostas;
- Vibrações produzidas por tráfego pesado, explosões, etc.

4.1.2.6 Clima

A dinâmica superficial está diretamente relacionada a parâmetros climáticos. Tal relação é enfatizada em diversos trabalhos abordando aspectos relativos à degradação dos solos.

Na estabilidade de taludes o fator climático mais importante a ser considerado é a precipitação, uma vez que raramente os registros de escorregamentos não estão associados a episódio de elevada pluviosidade.

Augusto Filho e Virgilli (1998) afirmam que as chuvas atuam como o principal agente não-antrópico na deflagração de escorregamentos no Brasil. Os grandes acidentes relacionados a esses processos ocorreram durante o período chuvoso, variando de região para região.

Guidicini e Iwasa (1976) citam que episódios de chuva intensa que superam 12% da pluviosidade anual média (PAM) tendem a provocar escorregamentos. Para

que tais episódios atinjam o caráter de catástrofe é preciso que superem os 20% da PAM. Segundo os autores, quando os níveis de pluviosidade são muito elevados, podem deflagrar escorregamentos tanto em áreas ocupadas ou alteradas quanto em áreas virgens, ou seja, os demais fatores que atuam nas encostas são secundários nos episódios de chuvas intensas.

A ocorrência de elevada pluviosidade é um dos aspectos a serem considerados na tentativa de análise das condições que conduzem ao aparecimento de escorregamentos. Portanto, a existência de chuva é condição necessária, mas nem sempre suficiente para o desencadeamento de escorregamento.

Para Rodrigues (1982), a intensidade das chuvas é extremamente importante no entendimento dos processos morfogenéticos, visto que ela pode variar significativamente durante um mesmo evento de precipitação. Chuvas de mesma intensidade, porém com duração diferente, desenvolvem ações erosivas diferenciadas, tanto maiores quanto mais longas a precipitação.

Os índices pluviométricos críticos para a deflagração dos escorregamentos variam com o regime de infiltração no terreno, o tipo de instabilização no maciço e a dinâmica das águas subterrâneas da vertente.

Moreira e Pires Neto⁶ (1998, apud Tabalipa, 2008) afirmam que chuvas intensas durante e ao final da estação chuvosa, quando os solos estão saturados, são decisivas para elevar a poropressão acima dos valores críticos e provocar escorregamentos.

Para Wolle e Carvalho (1989), a combinação de chuvas precedentes e um evento de chuva intensa de curta ou média duração representa a maior responsabilidade das chuvas na deflagração de escorregamentos em meio tropical úmido.

⁶ MOREIRA, C.V.R.; PIRES NETO, A.G. Clima E Relevô. In: Oliveira, A. M. Dos S.; Brito, S.N. A. de. 1998. Geologia de Engenharia. São Paulo, SP, Oficina de Textos. p. 69-86, 1998.

4.2 ESCORREGAMENTOS E CHUVAS INTENSAS

Estudos que correlacionem movimentos de massa a eventos pluviométricos intensos vêm sendo desenvolvidos ao redor do mundo ao longo dos últimos 50 anos (D'ORSI, 2011). Um dos primeiros trabalhos relevantes nessa área de estudo foi o de Endo (1970) que determinou que as avalanches nas montanhas de Ilha de Hokkaido (Japão) seriam desencadeadas a partir de intensidades pluviométricas de 200 mm/dia. Campbell (1975) determinou que grande parte dos escorregamentos nas montanhas de Santa Mônica (Califórnia, EUA) foram deflagrados pelo aumento da poropressão no solo, devido ao aporte das águas das chuvas. O resultado desse estudo foi reforçado posteriormente pela pesquisa de Wilson (1989), que também investigou movimentos de massa em montanhas da Califórnia.

Ainda na década de 1970, o trabalho de Peter Lumb se destacou como pioneiro na análise de movimentos de massa relacionados a chuvas intensas em regiões tropicais. Este autor e demais investigadores do *Hong Kong Geotechnical Engineering Office* (GEO) começaram a se dedicar mais profundamente sobre as correlações entre chuvas e escorregamentos no território de Hong Kong. Lumb (1975) reuniu dados de escorregamentos e pluviometria por 23 anos, de 1950 a 1973 e encontrou uma boa relação entre o índice pluviométrico acumulado em até 15 dias e a precipitação diária no dia do evento. Segundo D'Orsi (2011), o estudo de Lumb (1975) foi primeiro a indicar a relevância da chuva antecedente na correlação com a estabilidade de taludes e combiná-la a diversos fatores (altura do corte, efeito da massa, elevação do nível d'água, tipo de ruptura, capacidade de infiltração do solo, dentre outros) na avaliação da estabilidade dos taludes.

Para Lumb (1975), a principal causa dos escorregamentos estava associada à sucção, devido ao aumento da umidade, e eventos considerados severos (com registros de dezenas de escorregamentos) somente ocorriam quando a pluviometria acumulada em 15 dias ultrapassava 200 mm. Já eventos desastrosos (com deflagração de centenas de escorregamentos) demandavam, pelo menos, 350 mm acumulados nos 15 dias anteriores ao evento. Além disso, a pluviometria diária necessária para a ocorrência de eventos severos e desastrosos deveria ser de, pelo menos, 100 mm/24h.

Ainda em Hong Kong os estudos de Lumb (1975) foram contestados por Brand *et al.*, (1984) e, posteriormente Brand (1989), para estes autores as precipitações pluviométricas das últimas 24 horas que antecederam os eventos e, particularmente, na última hora constituíam os principais agentes deflagradores dos escorregamentos. Em maio de 1992 foram registradas chuvas intensas e escorregamentos em Hong Kong (350 mm/24h, 110 mm/h e 25 mm/5 min) que reforçaram a tese de Brand (1989) da direta dependência de altas intensidades pluviométricas e curta duração para a deflagração dos movimentos de massa e da pequena importância das chuvas antecedentes no desencadeamento dos escorregamentos.

Campbell (1975) e Nielsen e Brabb (1977), determinaram índices críticos na região da Baía de São Francisco, Santa Cruz e Los Angeles, na Califórnia (EUA). Os autores concluíram que chuvas com acumulados contínuos entre 150 e 200 mm que sucediam períodos chuvosos com cerca de 250 a 380 mm eram suficientes para deflagrar escorregamentos generalizados nas encostas daquelas regiões.

Wieczorek (1996) investigou a relação existente entre corridas de detritos e chuvas intensas nas encostas de Santa Cruz (Califórnia). Este autor concluiu que chuvas antecedentes (7 a 30 dias) com acumulados superiores a 280 mm, quando associadas a chuvas horárias entre 50 e 100 mm, apresentavam alta probabilidade de deflagração de corrida de lama e detritos.

Além da China e dos Estados Unidos que continuam se destacando em pesquisas científicas nesse ramo, outros países ao redor do mundo têm contribuído com pesquisas sobre o tema chuvas e escorregamentos com foco nas condicionantes fisiográficas locais. Como, por exemplo, Reino Unido, Japão, Suíça, Nova Zelândia, Brasil, Porto Rico, Himalaia, Sri Lanka, Coreia do Sul e Tailândia. Em particular na última década, a Itália tem mostrado o maior empenho na determinação dos limiares pluviométricos críticos, com destaque para o trabalho Guzzetti *et al.*, (2007), uma vez que o país tem sido palco de recorrentes eventos de chuvas intensas com deflagração de escorregamentos.

Em países tropicais, que é o caso do Brasil, um dos fatores mais significativos na deflagração de movimentos de massa é o volume de água infiltrado no perfil do solo (D'ORSI, 2011). Guidicini e Iwasa (1976) estudaram nove regiões do Brasil com registros de precipitações intensas e histórico de ocorrência de

deslizamentos e obtiveram resultados previsionais significativos de ocorrência de escorregamentos translacionais de solo apresentados em cartas de periculosidade.

No estudo realizado na Serra do Mar, região de Cubatão, Tatizana *et al.*, (1987 a, b) concluíram que a chuva acumulada em até 4 dias (96 horas) era determinante para a ocorrência de movimentos de massa considerando os dados da série histórica abordada de 30 anos.

Elbachá *et al.*,(1992), analisaram a influência da chuva na cidade de Salvador, a pesquisa concluiu que a maioria dos escorregamentos registrados no município estavam relacionados com um acumulado hídrico de 120mm em até 4 dias.

Ide (2005) que definiu a influência da precipitação acumulada em 7 e 5 dias nos deslizamentos de Campinas, para diferentes características geológicas.

A metodologia empírica desenvolvida por Tatizana *et al.*, (1987 a, b) estabelece o volume hídrico e o tempo de acúmulo necessário para a deflagração de escorregamentos numa determinada região considerando o inventário de acidentes naturais registrados na mesma, e o histórico pluviométrico num determinado intervalo de tempo. Tal metodologia vem sendo aplicada em diversos trabalhos que abordam a relação de chuvas intensas e movimentos de massa.

A Fundação Instituto de Geotecnia (GeoRio), órgão da Secretaria Municipal de Obras do Rio de Janeiro, utiliza desde o ano de 2000 um alerta acionado pelo índice de precipitação acumulada de quatro dias, através do método de Tatizana *et al.* (1987 a, b).

Soares (2006) caracterizou a relação da sazonalidade da precipitação com os eventos de deslizamento na região litorânea de Angra dos Reis, onde aplicou a metodologia de Tatizana *et al.*, (1987 a, b) para diversos critérios, destacando-se o acumulado de 2 dias. Tal estudo concluiu ainda que as precipitações assumem papel de agente de ação progressiva e agente de ação instantânea nos fenômenos de instabilidade de taludes. A ação progressiva, por exemplo, produz alterações da densidade do solo, diminuindo a coesão e aumentando o peso do solo, reduzindo a resistência ao cisalhamento.

A correlação da precipitação e deslizamentos para encostas na região urbanas de Ouro Preto, considerando 417 ocorrências entre 1988 e 2004 evidenciou que 5 dias de chuva acumulada é a que mais influencia na deflagração dos

escorregamentos (CASTRO, 2006). A autora verificou ainda que precipitações diárias de 55 mm associadas a acumulados pluviométricos de 129 mm em 5 dias apresentam alta probabilidade de desencadear eventos de grande porte (mais de 10 ocorrências).

Vieira (2004) estudou as encostas da região de Blumenau (SC) onde correlacionou a ocorrência de chuvas intensas e escorregamentos. O autor concluiu que acumulados pluviométricos de mais de 50 mm, precipitados em até 3 dias são suficientes para iniciar processos de instabilidade no município.

D'Orsi (2011) estudou os eventos de chuvas de alta intensidade e movimentos de massa na região serrana do Rio de Janeiro. O autor definiu como início do evento pluviométrico aquele momento em que, em 1 hora, o registro foi maior do que 20mm e o final do evento pluviométrico (data/hora) foi definido no momento em que a pluviometria acumulada em 4 horas consecutivas fosse menor do que 5 mm. O autor fixou os valores de pluviometria horária (mm/h) e de pluviometria diária (mm/24h) e variadas as correspondentes acumuladas pluviométricas em 1h, 12h, 24h, 48h, 72h e 96h, para se obter uma melhor configuração de tendência na curva que separa a pluviometria com e sem registro de escorregamento associada. O tratamento dos dados levou a 15 possibilidades de combinação entre acumuladas pluviométricas, e o autor concluiu que apenas a correlação entre a intensidade pluviométrica horária (mm/h) e a acumulada pluviométrica diária (mm/24h) apresentou resultados coerentes e consistentes.

Silva Dias *et al.*, (2013) concluíram que eventos de precipitação em grandes centros urbanos apresentam uma tendência à ocorrência de chuvas mais intensas em períodos mais curtos, e destacou a importância no desenvolvimento de estudos de impactos da precipitação nestas regiões. Para estes autores a análise histórica da precipitação no município de São Paulo, no período de 1931 a 2010 demonstrou que os processos urbanos, relacionados com ilhas de calor e poluição, podem, em parte, explicar os eventos pluviométricos extremos, somados aos padrões de variabilidade climática (MOLINA *et al.*, 2015).

Faceto *et al.*, (2012) estudaram a relação do clima e da precipitação com as ocorrências de deslizamentos de massa nos meses de verão em São Bernardo do Campo ao longo de 15 anos. Os autores concluíram que o acumulado hídrico dos meses anteriores a janeiro é fundamental para a ocorrência dos escorregamentos

visto que, o aumento do número de eventos de deslizamento entre dezembro e janeiro é muito mais expressivo do que aumento na precipitação, evidenciando a importância da saturação do solo e, conseqüentemente, a redução de seus parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito).

Para os autores Tatizana *et al.*, (1987b) e Delmonaco *et al.*, (1995) a influência da precipitação nos movimentos de massa se dá pela duração e ou intensidade das chuvas, basicamente, a partir de processos isolados ou em conjunto, são eles:

- Alteração dos parâmetros de resistência dos materiais: diminuição da coesão aparente (diminuição da sucção) em virtude do aumento da umidade do solo, dissolução da cimentação;
- Aumento da solitação externa. Aumento do peso específico dos materiais que formam a encosta;
- Avanço da frente de saturação do maciço, provocando o desenvolvimento de poropressão positiva nos solos, subpressões nas descontinuidades rochosas e forças de percolação;
- Alteração do perfil da encosta por erosão de materiais.

De maneira geral, as águas subsuperficiais que influenciam diretamente os processos de ruptura dos taludes decorrentes de chuvas são resultantes da interação entre os processos de infiltração, características geológicas dos maciços terrosos e rochosos, índices de umidade antecedentes e a pluviometria histórica da região (WIECZOREK, 1996).

Devido a grande variabilidade de condicionantes (geoestruturais, litológicas, topográficas, hidrogeológicas, pluviométricas, etc.) estes fenômenos ainda não são integralmente entendidos, o que dificulta a predição, com precisão, dos escorregamentos induzidos pelas chuvas (MOLINA *et al.*, 2015).

Para os autores, o monitoramento da intensidade pluviométrica e índices pluviométricos acumulados constitui o método mais eficiente para a definição da probabilidade de ocorrência de escorregamentos em regiões de grande amplitude, vertentes de serras, bacias hidrográficas e territórios municipais, com predomínio de escorregamentos rápidos a muito rápidos e onde a pluviometria é o principal agente deflagrador do processo. Por sua vez, regiões pequenas (taludes bem delimitados) e onde o processo de instabilização é lento, a instrumentação geotécnica

(piezômetros, medidores de nível d'água, inclinômetros e indicadores de deslocamento superficial) tende a oferecer bons resultados, em relação à identificação daqueles processos em especial quando se consegue associar o aumento da velocidade de deslocamento da massa monitorada com risco de ruptura integral.

Para Molina *et al.*, (2015) uma vez definidos os limiares pluviométricos críticos (intensidades ou acumuladas pluviométricas capazes de deflagrar escorregamentos) e monitorada a pluviometria, preferencialmente em tempo real, torna-se possível a previsão em curto prazo e com um razoável nível de confiança, da iminência de ocorrência daqueles processos de instabilização, sempre que aqueles limiares pluviométricos críticos são atingidos.

Existem, entretanto, diferentes modelos e metodologias para a definição de limiares pluviométricos, classificados como modelos físicos e empíricos.

4.3 MODELOS BASEADOS EM PROCESSOS FÍSICOS

Estudos de correlação de chuva e escorregamentos são baseados em metodologias que visam definir os limiares pluviométricos críticos, ou seja, níveis pluviométricos máximos e/ou mínimos necessários para que o evento ocorra. Segundo Guzzetti *et al.*, (2007) para escorregamentos diretamente associados a chuvas, o limiar pluviométrico mínimo define o menor volume de chuva abaixo do qual não ocorrem os escorregamentos. Por outro lado, o limiar máximo representa o volume hídrico acima do qual sempre ocorrem escorregamentos. A determinação dos limiares pluviométricos pode ser com bases físicas (modelos baseados em processos físicos, conceituais) ou bases empíricas (utilizando dados históricos e/ou estatística), cada tipo de modelo apresenta vantagens e desvantagens (D'ORSI, 2011).

Para Guzzetti *et al.*, (2007) uma melhor definição de limiares baseadas em modelos de processos físicos incorporam os modelos de infiltração de água nos perfis de solo às já existentes modelagens para cálculo de estabilidade de taludes (por exemplo, modelo de talude infinito). Assim, com os dados de medição da pluviometria acrescidos do cálculo das taxas de infiltração das águas, é possível

prever a ruptura da encosta (Fator de Segurança igual a 1,00). Estas determinações demandam uma grande gama de informações hidrológicas, litológicas, morfológicas, topográficas e geotécnicas do solo, assim como a necessidade de calibrações que utilizem eventos pluviométricos reais, ocorridos na área de interesse (D'ORSI, 2011).

As determinações de limiares pluviométricos baseados em modelos de processos físicos têm mostrado bons resultados nas predições de escorregamentos rasos (deslizamentos de solos e corridas de detritos) e pouca eficiência em escorregamentos profundos (GUZZETTI *et al.*, 2007).

Entre os anos de 1980 e 2000 pesquisadores da Nova Zelândia, tentaram estabelecer ligações entre a ocorrência de escorregamentos e as condições de umidade dos solos desenvolvendo um modelo conceitual simplificado que estima, diariamente, o status de água de solo antecedente (ASWS) e inclui um fator de drenagem diretamente associado à precipitação ocorrida nos dias anteriores ao escorregamento (CROZIER e EYLES, 1980; 1999, e GLADE *et al.*, 2000). Este modelo foi calibrado com dados de chuvas e deslizamentos ocorridos no ano de 1974 e previu com sucesso a ocorrência de dias com e sem deslizamentos no ano de 1996 (WIECZORECK e GLADE, 2005).

Tabalipa (2008) apresentou dados quantitativos e qualitativos de estabilidade de encostas no município de Pato Branco através da aplicação de um fator de segurança baseado na condição de equilíbrio limite. O autor classificou as encostas do rio Ligeiro ao longo de seu curso quanto à suscetibilidade a escorregamentos de solo, tendo como base o mapa de solos da EMBRAPA de 1999. Para cada tipo de solo aflorante na área, o autor considerou três cenários de saturação hídrica (0%, 50% e 100% saturado), além da existência ou não de vegetação e da pressão exercida pela força dos ventos na copa das árvores.

O autor concluiu que as áreas mais suscetíveis a escorregamentos estão associadas a encostas do rio Ligeiro onde a vegetação é mínima ou ausente, onde a declividade é superior a 20% e o solo é raso (cambissolo e neossolo). Concluiu ainda que na ausência da vegetação a suscetibilidade a escorregamentos independe da saturação hídrica do solo, já em encostas vegetadas o aumento de pontos de alta suscetibilidade a escorregamentos é diretamente proporcional ao aumento da saturação hídrica, sendo, portanto a água o principal agente determinante dos episódios de escorregamento de solo.

4.4 MODELOS EMPÍRICOS

Na construção de modelos empíricos, a definição do termo intensidade pluviométrica é fundamental. Para a maioria dos casos, este termo refere-se à altura de chuva na unidade de tempo, isto é, o quociente entre a altura e a duração, usualmente expressa em mm (ou polegadas) por hora ou em mm (ou polegadas) por minutos. Para valores muito prolongados (muitos dias a meses e anos), o termo passa a representar uma média do período (D'ORSI, 2011). Alguns autores também utilizam o termo “acumulada pluviométrica” para indicar o somatório das chuvas em mais de um período (CASTRO, 2006). Nestes casos, são comuns as comparações das chuvas acumuladas em diferentes períodos, por exemplo de 2, 3, 4, 10, 20 e 30 dias. Vale ressaltar que não existe um intervalo de tempo (minutos, horas, dias, etc.) ideal para caracterizar as condições pluviométricas em que são prováveis (ou não) as ocorrências de escorregamentos deflagrados por chuvas. Cada região analisada possui o seu intervalo de tempo ótimo.

Para Guzzetti *et al.*, (2007) quando observada por longos períodos, a intensidade pluviométrica representa um valor “médio” que subestima a razão pluviométrica máxima (mm/tempo) ocorrida durante o período de observação e, portanto, intensidades pluviométricas medidas em períodos curtos e longos possuem significados físicos diferentes. Os autores também acrescentam que valores de intensidades médias são mais usuais nos estudos de correlações entre chuvas e escorregamentos do que picos (máximas) de intensidades.

Os limiares pluviométricos estabelecidos por modelos empíricos geralmente utilizam para sua determinação, dados reais de eventos chuvosos com ocorrências de escorregamentos diretamente associadas. Nesse caso, diante da existência e disponibilidade de registros pluviométricos em eventos chuvosos em que não foram verificadas ocorrências de movimentos de massa, os registros máximos (acumuladas, intensidades, duração) também podem ser utilizados na análise. Os trabalhos de Lumb (1975), Tatizana *et al.*, (1987a,b), Jibson (1989), Corominas e Moya (1999) e Pedrozzi (2004) destacam-se como importantes contribuições para o desenvolvimento e uso prático nas análises com modelos empíricos.

Guzzetti *et al* (2007), analisaram 853 eventos de chuva com ocorrência de escorregamentos, onde dividiu e classificou os limiares pluviométricos empíricos em

(I) limiares que combinam medições de precipitações obtidas em eventos pluviométricos específicos; (II) limiares que consideram as condições antecedentes e (III) outros tipos de limiares. Os limiares definidos a partir de registros de eventos pluviométricos específicos (I), por sua vez, podem ainda ser subdivididos em:

- Limiares tipo Intensidade - Duração (ID);
- Limiares tipo Evento – Duração (ED);
- Limiares tipo Evento-Intensidade (EI) e
- Limiares que consideram a pluviometria total do evento.

Através da utilização de métodos estatísticos para a diminuição do erro (aproximação Bayesiana), os autores chegaram a interessantes conclusões:

- Chuvas com altas intensidades e curtas durações (normalmente associadas a sistemas convectivos) tendem a deflagrar escorregamentos rasos e corridas, enquanto que chuvas de intensidade moderada e longa duração tendem a deflagrar escorregamentos profundos;
- Para eventos com duração de até 200 horas, os limiares ID propostos apresentam bons resultados; contudo nos eventos mais longos, a pluviometria antecedente tem forte influência e as rupturas parecem estar mais associadas a processos não considerados nos modelos ID simples, tais como a recarga de água subterrânea e as rupturas progressivas;

Ainda segundo os autores, a climatologia regional influi na determinação dos limiares. Ao compararem limiares pluviométricos obtidos para regiões (principalmente europeias) com subdivisões climáticas diferenciadas, aqueles autores observaram que o nível mínimo de intensidade pluviométrica necessária para gerar escorregamentos é diferente. Para uma mesma pluviometria de curta duração (menor do que 30 horas), a intensidade pluviométrica média necessária para deflagrar escorregamentos nas regiões montanhosas e de clima mais frio é mais baixa do que a intensidade pluviométrica média necessária nas regiões de clima mais ameno nas latitudes médias. E finalmente que em regiões de clima ameno a duração das chuvas teria uma importância maior do que a intensidade necessária para deflagrar os escorregamentos, enquanto que nas áreas de

montanhas (e de climas mais frios) a intensidade pluviométrica teria uma maior relevância do que a duração das chuvas.

Embora menos frequentemente encontrados na literatura, existem estudos de correlação entre chuvas e escorregamentos em que os limiares propostos se basearam especialmente em volumes de chuva precipitados durante um evento capaz de deflagrar escorregamentos (D'ORSI, 2011). Dessa forma os limiares são obtidos a partir de cruzamentos com diversas variáveis pluviométricas, tais como pluviometria diária, pluviometria antecedente, pluviometria acumulada no evento (E) e pluviometria normalizada acumulada no evento (normalmente expressa como uma porcentagem da pluviometria anual média - PAM). Neste último tipo, destaca-se o trabalho de Guidicini e Iwasa (1976), que devido a sua abrangência em termos nacionais e divulgação internacional, pode ser incluído no rol de trabalhos com grande relevância mundial na correlação entre chuvas e escorregamentos. Estes autores utilizaram registros pluviométricos e ocorrências de escorregamentos de diferentes regiões do Brasil e concluíram que, quando a pluviometria total do evento excede a 12% da PAM, escorregamentos ocorrem independentemente das condições pluviométricas antecedentes ao evento, porém se a pluviometria total do evento corresponder entre 8 e 12% da PAM, escorregamentos ocorrem dependendo do histórico pluviométrico e se a pluviometria total do evento for inferior a 8% da PAM, não é provável a deflagração de escorregamentos.

Os autores consideraram, principalmente, a periodicidade das chuvas, a intensidade pluviométrica (antes e durante o evento) e a duração das chuvas. Além disso, estabeleceram coeficientes pluviométricos cujos valores indicariam diferentes “níveis de periculosidade” relativos à ocorrência de escorregamentos. Os coeficientes foram definidos do seguinte modo:

- CC: Coeficiente de ciclo ou histórico da pluviosidade (razão entre o registro acumulado até a data do evento e a média anual da pluviosidade).
- CE: Coeficiente de episódio (razão entre o registro pluviométrico do episódio e a média anual da pluviosidade).
- CF: Coeficiente final (= CC + CE).

Baseados no valor de CF, Guidicini e Iwasa (1976) propuseram 4 níveis de risco – A, B, C e D, relativos às probabilidades de ocorrência de escorregamentos de

100, 85, 33 e 0%, respectivamente. Do mesmo modo, utilizando-se valores de CF os autores estabeleceram 4 zonas de influência das chuvas antecedentes – A, B, C e D, correspondentes às probabilidades de 100, 67, 31 e 0%. Assim sendo, os autores acreditavam que as chuvas antecedentes tinham importante influência na elevação do risco potencial de escorregamentos, em especial até os 30 dias antes do evento.

As conclusões a que chegaram Guidicini e Iwasa (1976) podem ser assim resumidas:

- As chuvas antecedentes entre as 24 e 72 horas influem fortemente na probabilidade de ocorrência dos escorregamentos (quanto maiores às intensidades, maior o nível de periculosidade);
- Ocorrências de registros pluviométricos superiores a 12% da PAM em períodos com duração entre 24 e 72 horas anteriores tendem a deflagrar escorregamentos, independentemente das condições pluviométricas antecedentes ao evento;
- Ocorrências de registros pluviométricos entre 8% e 12% da PAM em períodos com duração entre 24 e 72 horas anteriores, somente deflagram escorregamentos se as chuvas antecedentes e as características físicas dos solos, em conjunto, possibilitarem a manutenção de um alto grau de saturação dos solos;
- Ocorrências de registros pluviométricos inferiores a 8% da PAM, em períodos com duração entre 24 e 72 horas, dificilmente ocasionam escorregamentos.

4.5 MODELOS PREVISIONAIS DE INSTABILIDADE DE ENCOSTAS

A previsão da ocorrência dos deslizamentos vem assumindo importância crescente na literatura geomorfológica e geotécnica (FERNANDES *et al.*, 2001). No entanto, há diferentes concepções do problema e diversas formas de investigação. Grande parte das metodologias propostas, por exemplo, visa a definição de áreas críticas a deslizamentos, ou seja, áreas de maior suscetibilidade à ocorrência do processo (CARRARA *et al.*, 1991; BARROS *et al.*, 1992; GUZZETTI *et al.*, 1999).

Outros estudos, por sua vez, buscam caracterizar o risco envolvido, englobando tanto a possibilidade de ocorrência do processo quanto às consequências ou danos decorrentes (BRAND, 1988, CERRI, 1993, AUGUSTO FILHO e WOLLE, 1996, e CRUDEN, 1997).

De modo geral, os principais procedimentos utilizados na previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos podem ser englobados em 4 grupos:

4.5.1 Análises a Partir da Distribuição dos Deslizamentos no Campo

A análise oriunda da observação de feições e coleta de dados em campo se baseia na hipótese de que a distribuição das cicatrizes e depósitos de deslizamentos recentes pode sugerir futuros padrões de comportamento das instabilidades (FERNANDES *et al.*, 2001). Dentro deste enfoque merece destaque os mapas inventários (WIECZOREK, 1984; AMARAL, 1996). Em geral, são apresentados produtos cartográficos que refletem a densidade de deslizamentos de uma área mapeada, seja para um único evento ou para uma série temporal de algumas décadas (CAMPBELL, 1973, WRIGHT *et al.*, 1974, GAO, 1993, LARSEN e TORRES-SANCHEZ, 1998, entre outros). No entanto, como destacado por Van Westen (1993), as informações geradas a partir desses procedimentos limitam-se apenas às áreas onde ocorreram deslizamentos no passado.

4.5.2 Análises a Partir de Mapeamentos Geomorfológicos e/ou Geotécnicos

Estes procedimentos caracterizam-se pela grande subjetividade, dependendo diretamente do nível de conhecimento do problema pelo investigador (Guzzetti *et al.*, 1999). Frequentemente, um mapa de suscetibilidade é obtido a partir da combinação de vários atributos ou mapas, que de um modo geral, têm pesos ponderados atribuídos aos diversos fatores condicionantes da instabilização, a partir da experiência adquirida (NIELSEN e BRABB, 1977, STEVENSON, 1977, AUGUSTO FILHO e WOLLE, 1996, entre muitos outros).

A atribuição de pesos a parâmetros de solo, relevo, vegetação entre outros, embora tenha se tornado muito comuns nas últimas décadas, principalmente com o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), permanecem com importantes limitações para o seu uso generalizado. Conforme lembra Van Westen (1993), dentre eles destaca-se a enorme subjetividade na atribuição de pesos e notas o que Gee (1992) classificou como ponderação cega, que decorre diretamente da falta de um melhor conhecimento dos fatores condicionantes no campo. Em geral, os critérios de instabilidade e as regras para a combinação dos dados são diferentes para cada especialista, dificultando a comparação e uma análise detalhada dos resultados obtidos, com ênfase na definição da importância relativa de cada parâmetro estudado (LEROI, 1997).

4.5.3 Modelos Probabilísticos

Modelos probabilísticos foram desenvolvidos visando uma menor subjetividade e melhor repetitividade nos mapeamentos de áreas suscetíveis. Conforme destacado por Guzzetti *et al.*, (1999), o princípio norteador aqui é a existência de relações funcionais entre os fatores condicionantes da instabilização e a distribuição dos deslizamentos na paisagem, tanto atuais quanto pretéritos. Brabb *et al.*, (1972), Carrara *et al.*, (1991), Van Westen, (1993), Carrara *et al.*, (1995), Leroi, (1997), Guzzetti *et al.*, 1999, e Santos, (2000) entendem que tais modelos assumem que os fatores que causaram a instabilidade em certo local no passado se preservam ao longo do tempo, portanto serão os mesmos que ali gerarão futuros escorregamentos. Nestes métodos, os critérios e regras de combinação são baseados em fatos, ou seja, padrões mensurados a partir de observações de campo, ao invés da simples experiência do pesquisador, tornando-se de suma importância, a disponibilidade de extensos bancos de dados representativos dos processos a serem previstos, fato este ainda raro na realidade brasileira.

4.5.4 Modelos Determinísticos

Nesta abordagem são utilizados modelos matemáticos que possuem, em maior ou menor grau, bases físicas, ou seja, que descrevem alguns dos processos e leis físicas que controlam a estabilidade das encostas (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998, e FIORI e CARMIGNANI, 2009).

As maiores limitações desses procedimentos, na maioria dos casos, encontram-se associadas ao conhecimento incompleto que possuímos de muitos dos processos envolvidos e à dificuldade de obtenção dos dados requeridos pelos modelos, em especial quando aplicados a grandes áreas. Em geral, os dados das principais propriedades dos materiais no campo estão disponíveis em pequenas quantidades e possuem baixa qualidade, uma vez que são raros os estudos que incorporam a questão da variabilidade espacial, e mesmo temporal, dessas propriedades.

Alguns desses procedimentos acoplam modelos de fluxos subsuperficiais, a partir dos quais a distribuição espacial das poropressões ou da umidade pode ser estimada com modelos de estabilidade como o método do Talude Infinito, em geral voltados para a previsão de escorregamentos translacionais rasos (BEVEN e KIRKBY, 1979, e O'LOUGHLIN, 1986). Métodos estocásticos são frequentemente utilizados na obtenção de alguns dos parâmetros de entrada de modelos determinísticos (MULDER e VAN ASCH, 1988; HAMMOND *et al.*, 1992).

O modelo de Dietrich e Montgomery (1998), utilizado para designar o grau de estabilidade de uma encosta, é baseado na combinação dos modelos de estabilidade de encosta infinita (balizado por variáveis físicas), com o modelo hidrológico de estado uniforme, que considera a taxa de recarga uniforme em função da área de recarga a montante (O'LOUGHLIN, 1986). A metodologia desses autores permite a definição do índice pluviométrico crítico (Q_c) para uma determinada encosta, associando dados geotécnicos e hidrológicos da vertente a dados de vazão e tempo de precipitação de um determinado evento pluviométrico.

Modelos determinísticos são aplicados por meio de equações sequencialmente derivadas. A espacialização das equações pode ocorrer por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para armazenamento e diversas operações, onde são empregadas técnicas geomorfométricas tendo por base um

Modelo Digital do Terreno (MDT) na análise das vertentes. O crescente aumento na disponibilidade de MDT's e seus derivados, com incremento contínuo na resolução, viabilizam o emprego dessas metodologias.

Aplicações das técnicas de SIG para espacialização das equações de FS foram empregadas por Fiori (1995a), Fiori (1995b), Girardi (1999), Nunes (2002), Fiori e Nunes (2003), Amaral (2003), Borchardt (2005), Kosziak (2005), Tabalipa (2008). Há também rotinas computacionais customizadas para a aplicação do fator de segurança em SIG, cabe destacar dois exemplos amplamente difundidos, o SHALSTAB e o SINMAP. O SHALSTAB teve seu desenvolvimento nos EUA (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994, DIETRICH e MONTGOMERY, 1998). No Brasil já foi empregado em diversos trabalhos, alguns exemplos são Fernandes *et al.*, (2001), Fernandes *et al.*, (2004), Guimarães (2000), Guimarães *et al.*, (2003), Ramos *et al.*, (2007), Vieira (2007), dentre diversos outros. O SINMAP (Pack *et al.*, 1998a, Pack *et al.*, 1998b e Pack *et al.*, 2001) também amplamente empregado, possui rotinas customizadas que facilitam a aplicação do FS, pois resolvem todas as fases de processamento, no entanto o emprego da equação em SIG sem fazer uso das rotinas pré-determinadas permite ao operador maior liberdade no tratamento e inclusão das variáveis consideradas no FS (SILVEIRA *et al.*, 2012).

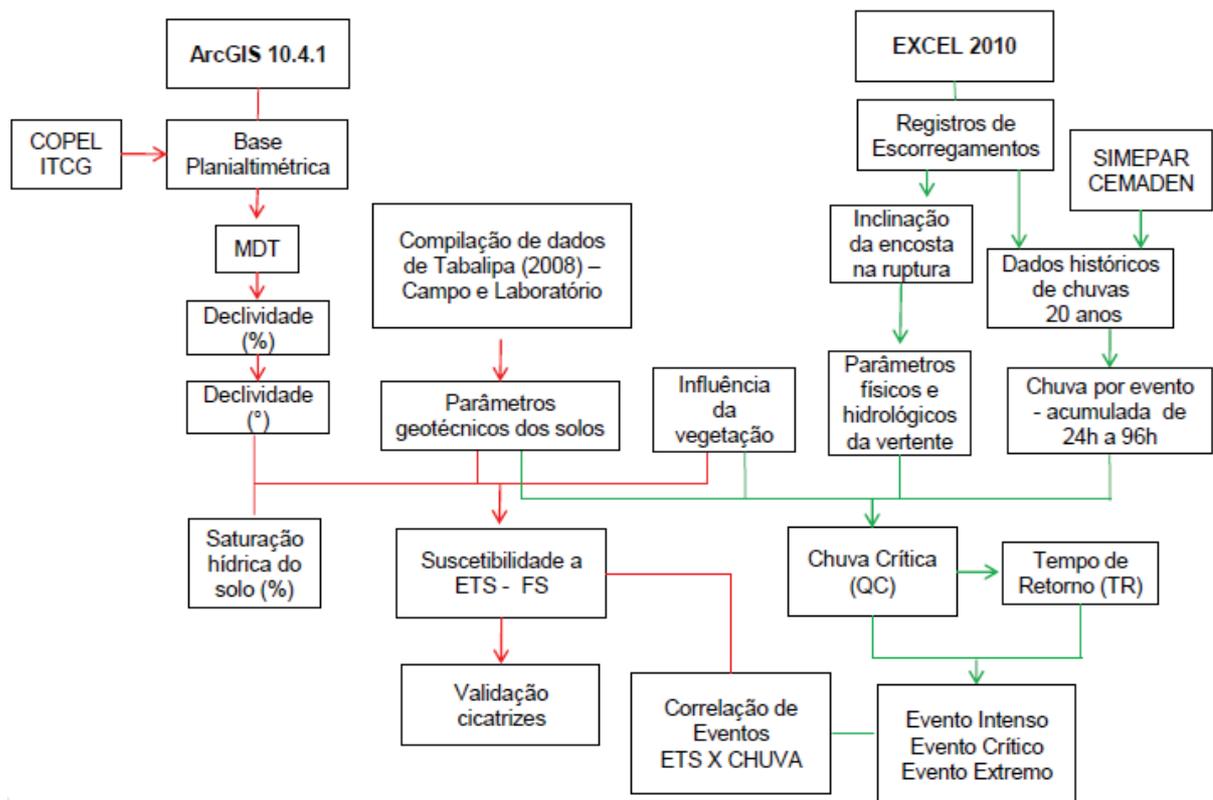
Conforme destacado por Van Westen (1993), a grande maioria dos procedimentos listados não consideram a probabilidade de ocorrência de um evento específico em um determinado momento e em certo local. Por essa razão, torna-se necessário a obtenção de relações entre o acontecimento dos deslizamentos e a frequência de ocorrência de certos fatores que deflagram a ruptura. Na grande maioria das situações, em especial para a realidade brasileira, o principal fator iniciador é a chuva.

Fernandes *et al.*, (2001), destacam que a real validação dos resultados estimados por modelos de previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos está condicionada a relação dos procedimentos adotados com os sistemas de monitoramento de campo, principalmente aqueles voltados para a caracterização da dinâmica hidrológica das encostas.

5. MATERIAIS

Os tratamentos de dados e as subseqüentes aplicações de métodos ocorreram paralelamente ao longo de toda a pesquisa. A organização das bases e correlação dos resultados se deu de acordo com o fluxograma operacional abaixo (Figura 5.1).

FIGURA 5.1 - FLUXOGRAMA ORGANIZACIONAL DO PROJETO



FONTE: A autora (2018)

5.1 DADOS TOPOGRÁFICOS

A base planialtimétrica utilizada é produto da junção de duas bases de dados. A base topográfica apresenta escala de detalhe 1:1000 com curvas de nível equidistantes em 1 metro aferida pela Secretaria de Desenvolvimento Urbano (PARANACIDADE, 2016).

A área objeto desse estudo possui dados pontuais de altimetria aferidos a cada 5 metros coletados pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2014). Ambas as bases foram cedidas pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG).

5.2 DADOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS

A base de dados utilizada para a confecção dos modelos de FS e chuvas críticas a partir de características da vertente, foi extraída da compilação de dados de Tabalipa (2008) que analisou 9 amostras de solo deformadas e indeformadas coletadas na área de estudo.

Os ensaios realizados por Tabalipa (2008) contemplaram: análise granulométrica, limites de Atterberg (limite de liquidez e plasticidade), teor de umidade, cisalhamento direto (para obtenção do peso específico aparente, coesão e ângulo de atrito interno). As coletas foram realizadas conforme a norma NBR 9604/86, segundo o manual de procedimento do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME/UFPR).

Os parâmetros geotécnicos foram estabelecidos a partir da média dos valores de 7 das 9 amostras de Tabalipa (2008). Foram consideradas apenas amostras de solos do tipo latossolo vermelho e cambissolo eutrófico devido a representatividade da área. Latossolos cobrem 69% e cambissolos 13,18%, juntas as duas classes de solos totalizam 82,18% da cobertura de solos do perímetro urbano de Pato Branco.

5.3 PARÂMETROS FÍSICOS DAS VERTENTES

Os parâmetros físicos das vertentes contemplam a inclinação das encostas, os parâmetros relativos à presença de vegetação (pressão exercida pela força dos ventos sobre a copa das árvores, pressão exercida pelo peso da vegetação sobre a encosta e força de atirantamento de raízes), e os parâmetros

hidrológicos da vertente (transmissividade, condutividade hidráulica, vazão de base e área de contribuição da bacia).

Exceto pela inclinação das vertentes, dados extraídos do atributo de declividade, os demais parâmetros acima citados foram compilados dos trabalhos de Tabalipa (2002 e 2008).

5.4 DADOS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO (ETS)

Os escorregamentos de solo descritos encontram-se inseridos na área de estudo. A pesquisa em si contemplaria todos os registros do município, porém não existe nenhuma ocorrência catalogada além do perímetro urbano.

Pato Branco embora apresente todos os condicionantes para a ocorrência de movimentos de massa, detém uma quantidade ínfima de dados desses eventos. A escassez de informações e evidências de escorregamentos propriamente dita, não significa que estes não ocorram, e sim que por diversas razões os eventos não são registrados como deveriam.

Dentre os fatos relatados pela Prefeitura municipal e suas secretarias de Planejamento Urbano, Obras Públicas e Administração e Finanças, pela defesa civil local e pelo corpo de bombeiros, o baixo índice de registros acontece pela inexistência um órgão municipal responsável por fazê-lo. A defesa civil do estado por sua vez, só é notificada de um escorregamento na existência de danos físicos ou financeiros consideráveis, ou na averiguação de risco eminente a segurança local. Outra possível causa é o não acionamento das autoridades competentes, pelos moradores, diante de ocorrências de baixa gravidade.

Este trabalho contempla dados registrados de chuva de 1998 a 2018. A busca por registros de escorregamento se restringiu ao mesmo período. Entre os anos de 1998 e 2018, o município de Pato Branco registrou ao menos oito ocorrências de escorregamento translacional de solo (Tabela 8). Os eventos foram classificados de acordo com a ordem cronológica de ocorrência, georreferenciados, e caracterizados com a abrangência de informações permitida pelo banco de dados da pesquisa. As cotas dos eventos foram coletadas da base topográfica e os valores referentes à inclinação das vertentes extraídas do modelo de declividade em grau.

TABELA 8 - REGISTROS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO (ETS)

ETS N°	DATA	COTA EM METROS	COORDENADAS UTM	DECLIVIDADE DA ENCOSTA	LOCALIZAÇÃO BAIRRO	REGISTRO
1	17/10/00	745	332483/7099772	20°	Bartot	UTFPR
2	16/09/13	807	332255/7097667	36°	Centro	CPRM - MME
	22/09/13					
3	02/12/13	787	332274/709764	23°	Centro	Defesa Civil PR
4	08/06/14	801	332211/7097636	39°	Centro	UTFPR
5	27/06/14	801	332211/7097637	34°	Centro	UTFPR
6	07/11/14	774	333778/7096068	19°	Bonatto	Defesa Civil PR
7	10/12/15	807	332255/7097667	28°	Centro	Defesa Civil PR
8	04/11/17	767	332452/7098711	5°	Centro	Jornal Diário do Sudoeste

FORNTE: Modificado de DEFESA CIVIL (2018), UTFPR (2018), CPRM (2013) e DIARIO DO SUDOESTE (2017)

Dos oito escorregamentos catalogados, as secretarias municipais de Pato Branco só detêm informações de três, aqueles registrados pela defesa civil estadual, sendo o primeiro ocorrido em 02/12/2013, e os demais 07/11/2014 e 12/10/2015 respectivamente; três foram registrados por pesquisadores locais, sendo o mais antigo datado de 17/10/2000, e os demais registrados em um curto intervalo de tempo e na mesma encosta nos dias 08 e 27/06/2014; um evento em setembro de 2013, publicado pela CPRM - MME; e o último evento datado de 04/11/2017 publicado no Jornal Diário do Sudoeste.

Do segundo escorregamento considerado não se pode afirmar a data e tão pouco o índice pluviométrico registrado no momento da ruptura, os dados referentes a este evento foram coletados da publicação do Ministério de Minas e Energia em parceria com a CPRM, intitulado “Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa, Pato Branco – Paraná”, que identifica e localiza a cicatriz, e a descreve como evento recente. O relatório apresenta fotografias datadas de 07/10/2013, essa data foi tida como limite para a verificação de dias chuvosos com potencial para desencadear movimentos de massa nos dois meses anteriores. A análise dos dados pluviométricos registrados em setembro/2013 evidenciou dois dias índices de chuva elevados, os dias 16 e 22 apresentaram picos de chuva e índices acumulados superiores a 60 mm, medida

suficiente para provocar a ruptura da vertente em questão se considerados os dados de chuvas dos demais eventos datados.

5.5 EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS INTENSOS SEM REGISTROS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Diante da escassez de dados de escorregamentos na área de estudo, a pesquisa considerou dias em que os registros de chuva ultrapassaram os índices dos limiares de ruptura dos eventos catalogados, porém sem nenhum registro conhecido de ETS. Dos dias apontados pela análise, foram selecionados oito sendo três eventos com teor de chuva diário acumulado superior a 100 mm, (Tabela 9).

TABELA 9 - EXEMPLO DE DIAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS INTENSAS, SEM REGISTROS CONHECIDOS DE MOVIMENTOS DE MASSA.

Dia	Média Mensal mm/mês	Eventos Diários	Ac. Evento mm/evento	Pico de Chuva mm/hora
14/11/2007	180,3	1	88,2	85,2/10h
12/10/2009	241,5	1	78,4	78,4/9h
22/04/2010	174,8	1	360,6	129,0/10h
26/04/2010		1	66,4	32,5/1h
11/03/2011	146,7	1	147,2	91,2/2h
28/03/2011		1	86,6	102,23/24h
30/03/2011		1	66,2	55,4/2h
27/02/2016	178,2	1	108,8	97,8/4h

FONTE: A autora, (2018)

Na tabela 9 encontram-se as médias das precipitações mensais e os dados de chuva referentes às datas de interesse. Vale destacar que em todos os casos o acumulado hídrico se deu em um único evento pluviométrico, ou seja, chuva ininterrupta. Outro destaque é a coluna de pico de chuva, que contempla o intervalo do evento cuja chuva apresentou maior intensidade de precipitação.

5.6 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos utilizados para definição das séries históricas e classificação do grau de criticidade dos eventos de escorregamentos translacionais de solo (ETS) foram fornecidos pelo SIMEPAR, uma instituição comprometida com o apoio ao desenvolvimento técnico-científico, econômico e social do Paraná e do Brasil, possibilitando a geração de dados e informações de natureza hidrológica, meteorológica e ambiental.

A base de dados do SIMEPAR foi utilizada para a elaboração dos gráficos dos índices pluviométricos acumulados nas horas antecedentes aos eventos de escorregamento, assim como os índices acumulados em até 4 dias anteriores. Esses dados foram coletados na estação pluviométrica localizada na BR 158 – KM 497, coordenadas geográficas 26°06'59" S, 52°40'59" W, e altitude de 721,80m do município de Pato Branco entre os anos de 1998 e 2018 e contém uma vasta gama de informações registradas de hora em hora dentre elas, pluviosidade, temperatura, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar.

Para a validação dos dados de chuva diários dos ETS, foram comparados os dados das estações locais que possuem séries históricas, conforme Tabela 10. Quatro das onze estações meteorológicas em funcionamento no município possuem dados históricos de chuva, destas, três encontram-se inseridas na área de estudo. As estações Pato Branco (principal fonte de dados) e Passo da Ilha são operadas pela agência Águas do Paraná, a estação Pato Branco – SE é operada pela Copel, e por fim a estação Alvorada operada pelo CEMADEN (Figura 5.2). Os dados utilizados encontram-se disponíveis para download no site da Agência Nacional das Águas (ANA), e possuem um compilado de informações meteorológicas de até 45 anos de observações.

TABELA 10 - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE PATO BRANCO – PR. BASE DE DADOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS

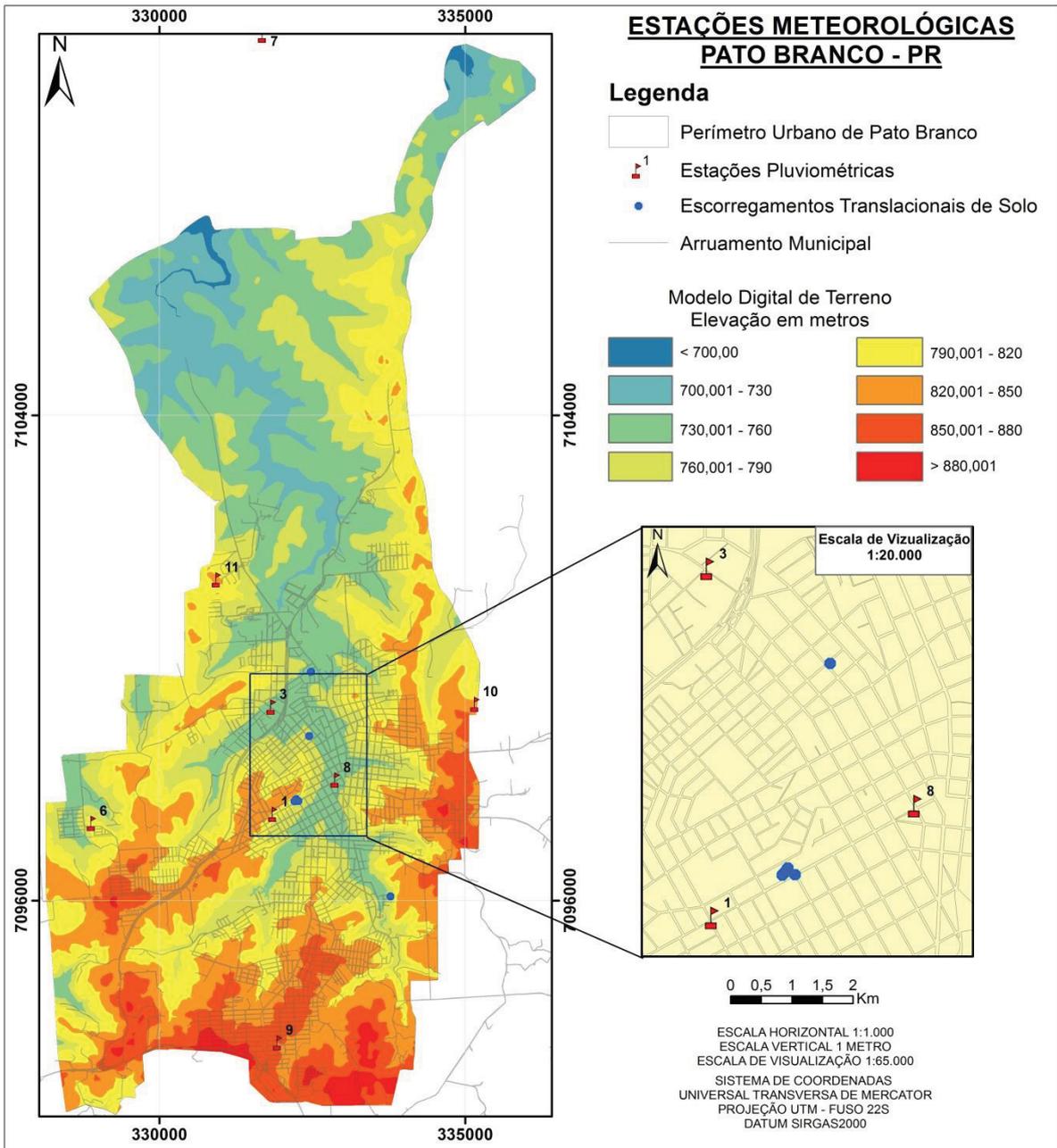
Nº	CÓDIGO	NOME	OPERADORA	UTM	COTA	INICIO DA ATIVIDADE	SÉRIE HISTÓRICA
01	2652013	Pato Branco	AGUASPARANÁ	331858.13051/ 7097420.49534	800	01/08/1964	1964 - 2015
02	2652033	Passo Da Ilha	AGUASPARANÁ	340507.133418/ 7097751.53629	700	01/02/1976	1976 - 2015
03	2652036	Pato Branco - Se	COPEL	331835.11321/ 7099192.9189	765	01/11/1987	1987 - 2000
04	2652039	Baldin	IAPAR	341713.462428/ 7108623.66366	560	01/07/1992	
05	2652040	Guarez	IAPAR	340066.830124/ 7106720.09538	660	01/08/1992	
06	2652041	Rigo	IAPAR	335162.417228/ 7099235.68865	800	01/07/1992	
07	2652035	Pato Branco	SIMEPAR	331691.551856/ 7110270.48455	700	01/05/1997	1998 - 2018
08	2652065	São João	CEMADEN	328892.376642/ 7097270.83323	795	01/01/2014	
09	2652066	Alvorada	CEMADEN	331937.048774/ 7093654.47296	858	01/01/2014	2014 - 2018
10	2652067	Fraron	CEMADEN	330938.354473/ 7101286.35795	825	01/01/2014	
11	2652068	Centro	CEMADEN	332880.009072/ 7097987.70249	757	01/01/2014	

FONTE: Modificado de AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2018).

A análise dos dados das 4 estações permitiu a definição da média pluviométrica registrada no município nos dias em que ocorreram eventos, considerando a distribuição das chuvas registradas em diferentes pontos da cidade, visto que as estações localizam-se em pontos estratégicos para o monitoramento dos eventos meteorológicos locais (Tabela 11).

Na figura 5.2 é possível observar a proximidade das estações Pato Branco, Pato Branco – SE e São João, com 6 dos 8 eventos de escorregamento de solo, considerados nessa pesquisa.

FIGURA 5.2 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS EXISTENTES NA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A Autora (2018)

TABELA 11 - MÉDIA PLUVIOMÉTRICA ACUMULADA NOS DIAS DE OCORRÊNCIA DE ETS, CONSIDERANDO A DESTRUIÇÃO LOCAL DAS CHUVAS

(CONTINUA)

ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO REGISTRADO POR ESTAÇÃO					
DIA	CODIGO	NOME	OPERADORA	CHUVA AC. 24H	MÉDIA DIÁRIA ACUMULADA MM/DIA
17/10/2000	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	43,5	49,78
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	56,6	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	58	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	46,3	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	-	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	44,5	
16/09/2013	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	-	60,4
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	-	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	55	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	-	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	65,8	
22/09/2013	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	-	48,5
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	-	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	36	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	-	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	61	
02/12/2013	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	-	61,55
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	-	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	69,5	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	-	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	53,6	
08/06/2014	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	-	53,7
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	-	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	57,2	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	-	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	50,2	

FONTE: SIMEPAR, (2018) e AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2018)

TABELA 11 - MÉDIA PLUVIOMÉTRICA ACUMULADA NOS DIAS DE OCORRÊNCIA DE ETS, CONSIDERANDO A DESTRUIÇÃO LOCAL DAS CHUVAS

(CONTINUAÇÃO)

ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO REGISTRADO POR ESTAÇÃO					
DIA	CODIGO	NOME	OPERADORA	CHUVA AC. 24H	MÉDIA DIÁRIA ACUMULADA MM/DIA
27/06/2014	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	107,3	111,56
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	108,4	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	112,2	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	127,7	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	102,2	
07/11/2014	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	117,4	96,89
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	94,7	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	92,8	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	85,15	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	94,4	
10/12/2015	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	85,5	66,675
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	70,4	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	68	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	74,1	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	42,8	
04/11/2017	2652013	PATO BRANCO	AGUASPARANÁ	-	49,280
	2652033	PASSO DA ILHA	AGUASPARANÁ	-	
	2652035	PATO BRANCO	IAPAR	41,4	
	2652036	PATO BRANCO - SE	COPEL	-	
	2652066	ALVORADA	CEMADEN	54,64	
	2652042	PATO BRANCO	SIMEPAR	51,8	

FONTE: SIMEPAR, (2018) e AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, (2018)

As precipitações mensais médias consideradas na pesquisa foram extraídas das observações registradas entre os anos de 1979 e 2016 na estação código 02652035 (IAPAR/SIMEPAR). Os dados horários de chuva dos últimos 20 anos disponibilizados pelo IAPAR, foram extraídos da mesma estação.

A coluna em destaque na tabela 12 contempla a precipitação média mensal do período acima citado. Nessa coluna verifica-se que os meses de outubro a janeiro concentram os maiores volume de chuva e que todas as médias aferidas superaram

145mm/mês exceto pelo mês de agosto, cujo valor estimado é de 115mm/mês. A precipitação média anual nos 40 anos contemplados pela análise foi de 2.098mm/ano.

TABELA 12 - DADOS METEOROLÓGICOS HISTÓRICOS DA ESTAÇÃO PATO BRANCO (02652035 - IAPAR/SIMEPAR)

ESTACAO: PATO BRANCO / CODIGO: 02652035 / LAT: 26.07 S / LONG: 52.41 W / ALT: 700 M

PER.: 1979/2016

MES	TEMPERATURA DO AR (.C)					U.REL		VENTO		PRECIPITACAO			EVAPOR.		INSOL.	
	média máxima	média mínima	máxima abs	ano	min abs	ano	média comp	média %	dir pr.	m/s	total	máxima 24h	ano	dias chuva	total mm	total horas
JAN	28,8	18,1	34,0	86/06	9,8	80	22,6	75			189,2	110,0	80	14	94,8	238,2
FEV	28,5	18,2	35,0	79/14	8,0	87	22,3	78			178,2	112,2	83	14	76,0	199,3
MAR	28,0	17,0	36,6	2005	3,6	87	21,4	75			146,7	125,0	2011	11	89,2	230,5
ABR	25,5	14,9	32,6	2004	0,8	99	19,2	76			174,8	168,0	2010	10	77,7	205,9
MAI	21,7	11,7	29,8	81	-0,2	2007	15,7	78			194,0	135,0	2013	10	66,6	191,5
JUN	20,4	10,5	27,8	2015	-3,8	94	14,4	78			170,3	155,0	97	10	61,6	171,8
JUL	20,5	10,0	28,8	2016	-4,0	2000	14,3	74			145,3	178,3	83	10	84,5	200,7
AGO	22,8	11,4	32,0	94/98	-3,5	84	16,2	68			115,2	142,0	2011	8	103,4	212,5
SET	23,6	12,3	35,2	88	-1,0	80	17,0	69			170,3	102,5	2014	11	106,5	189,3
OUT	25,8	14,8	35,6	2014	1,6	85	19,6	71			241,5	90,0	2005	12	106,3	205,2
NOV	27,4	16,0	36,7	85	6,0	79/92	21,0	69			180,3	105,7	90	11	114,3	230,8
DEZ	28,4	17,4	36,6	85	6,2	82	22,1	73			192,1	122,8	2002	13	107,3	230,8
ANO	25,1	14,4					18,8	73,6			2098			134	1088	2507
EXT			36,7		-4,0							178,3				

FONTE: IAPAR, (2018)

Outro ponto de destaque é a indicação da máxima precipitação acumulada em 24h. Nos 40 anos considerados, as máximas verificadas nos meses de março e abril foram registradas nos anos de 2011 e 2010 respectivamente. Ambos os meses apresentaram picos anômalos de chuva e estão indicados na tabela 9 como registros de eventos intensos sem ocorrências conhecidas de ETS.

6. MÉTODOS

6.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

Os dados foram processados em Sistemas de Informações Geográficas – SIG que possibilita a representação da superfície terrestre através de modelos digitais do terreno (MDT). Tais modelos permitem a análise topográfica de uma zona de interesse, assim como o cálculo automatizado de uma série de variáveis.

A representação digital da superfície ou MDT consiste na representação em SIG de uma seção da superfície terrestre, dada por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (X, Y) e um valor de atribuído de pixel, correspondente à elevação (z). A escolha do valor que será atribuído ao pixel é feita através de cálculos determinísticos que consideram a resolução compatível com a base topográfica do modelo.

O modelo hipsométrico foi confeccionado a partir dos dados disponíveis do mapeamento da porção urbana de Pato Branco. O detalhamento da base planialtimétrica em escala horizontal 1:1.000, com curvas de nível equidistantes em 1 metro, permitiu a utilização de uma resolução espacial de 1 metro.

O MDT foi processado no *software* ArcGIS versão 10.4.1 (ESRI, 2015), com algoritmo ANUDEM (*Topo To Raster*), que consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grade a partir de um conjunto de amostras de entrada que podem ser regularmente ou irregularmente espaçadas, tendo os vértices dos retângulos estimados a partir das amostras com relações topológicas explícitas entre os mesmos (FELGUEIRAS, 1998). O interpolador *Topo to Raster* difere-se de outros métodos de interpolação, por gerar MDT segundo a hidrografia e com grade regular que possibilita a estimação de inúmeras variáveis do terreno como declividade, relevo sombreado e curvatura de vertentes.

6.1.1 Atributos Topográficos

As variáveis geomorfométricas são atributos que representam de forma quantitativa as características morfológicas da paisagem descritas de forma contínua (SILVEIRA *et al.*, 2013) É o processo de extração de atributos quantitativos obtidos por meio de equações aplicadas a um Modelo Digital do Terreno (MDT), executado por meio de técnicas de modelagem digital, que descreve de forma quantitativa as formas do relevo.

A declividade é o atributo topográfico mais empregado em modelos provisionais de deslizamentos, dentre eles, o modelo matemático do fator de segurança (FS), que faz uso a declividade em grau como dado de entrada.

A declividade é utilizada ainda na definição de áreas com inclinação superior a 30 e 45%, sendo estes dois valores pontos de importância para o planejamento urbano. O primeiro (30%) é o limite permitido pela legislação federal para liberação de loteamento destinado a habitação e o segundo (45%) representa o limite de declividade a partir do qual as encostas passam a ser consideradas áreas de proteção permanente (APP).

6.1.1.1 Declividade

A declividade é o parâmetro físico que define a inclinação do terreno ou plano a ser analisado, em relação a horizontal, e pode ser expressa em grau ou porcentagem.

Os mapas da declividade foram elaborados utilizando a ferramenta "Slope" do "Arctoolbox – spatial analyst tools" tendo como dado de entrada o MDT. Os rasters gerados foram classificados de acordo com a proposta de EMBRAPA (2006), com seis classes de declividade em percentual e estas, foram recalculadas para grau.

Na Tabela 13 estão dispostos os intervalos classificatórios baseados na inclinação das vertentes, segundo EMBRAPA (2006). As classes em percentual foram transformadas em grau para confecção do Fator de Segurança.

TABELA 13 - CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO SEGUNDO A DECLIVIDADE

Declividade (%)	Declividade (°)	Classificação o Relevo
0 - 3	0 - 1,72	Plano
3 - 8	1,72 – 4,57	Suave Ondulado
8 - 20	4,57 – 11,31	Ondulado
20 - 45	11,31 – 24,23	Forte Ondulado
45 - 75	24,23 – 36,87	Montanhoso
> 75	> 36,87	Escarpado

FONTES: Adaptado de EMBRAPA (2006)

6.1.1.2 Índice de Posição Topográfica (IPT)

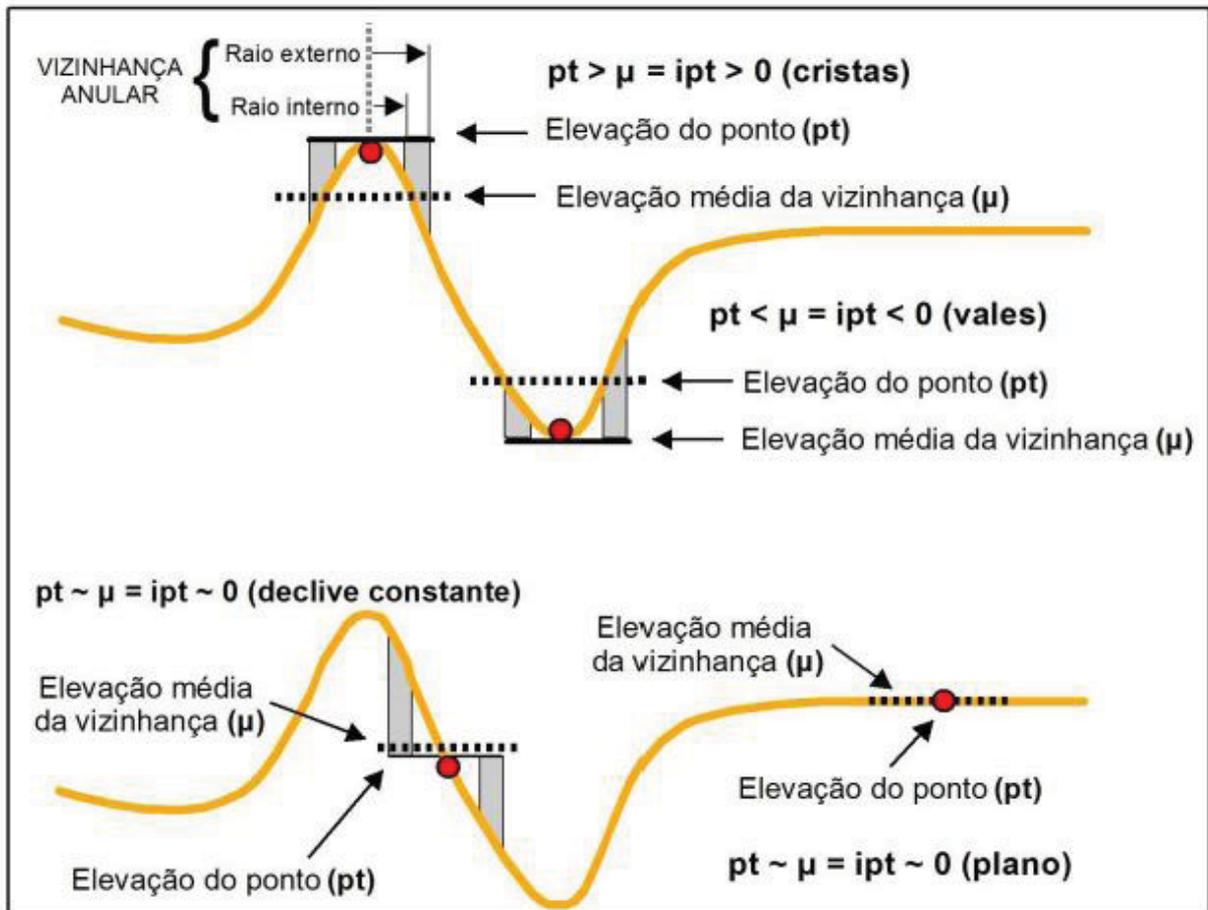
O índice de posição topográfica (IPT) é um atributo topográfico gerado a partir do MDT, neste trabalho foi empregado para a identificação do trecho das encostas (superior, intermediário ou inferior) em que se localizam os escorregamentos de solo. A classificação do IPT é baseada em parâmetros geomorfométricos do relevo, segundo a proposta de Weiss (2001). Para o autor, o IPT é derivado de algoritmo que mensura a diferença entre a elevação de um ponto central (Z_0) e a média da elevação (\bar{Z}) ao seu entorno com um raio predeterminado (R) (Figura 6.1).

(Eq. 1)

$$IPT = Z_0 - \bar{Z}$$

Para a obtenção do IPT se faz necessária uma sequência de ações no software ArcGis. O primeiro passo é a confecção do raster da média de elevação ponto a ponto do modelo, para isso o MDT é processado com a ferramenta “focal statistics” localizada no “ArcToolbox – spatial analyst tools – neighborhood”. Após a obtenção do raster da média do MDT, é aplicado o algoritmo de Weiss (2001), através da ferramenta álgebra de mapas, o resultado da equação é o IPT.

FIGURA 6.1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA



FONTE: SILVEIRA (2015), adaptado de WEISS (2001)

A análise da vizinhança se dá a partir de uma janela móvel que pode ser circular, anular (proposta original), retangular ou irregular. Para este trabalho a janela de análise de vizinhança foi circular.

Os valores positivos obtidos pelo IPT representam locais que são mais elevados que a média de seu entorno, caracterizando as cristas ou litotipos mais resistentes aos processos intempéricos denudacionais (SILVEIRA, 2015). Os valores negativos representam os locais mais rebaixados em relação à vizinhança caracterizando o terço inferior de vertentes e fundos de vale ou depressões. Já os valores próximos a zero representam as superfícies de declive constante, destacando-se as áreas planas.

Weiss (2001) discretiza os valores contínuos do IPT a partir do desvio padrão fornecido pelo raster. As formas de relevo são estabelecidas pelo particionamento de uma matriz única resultante dos valores do IPT (Tabela 14).

TABELA 14 - ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICO DISCRETIZADO EM 6 CLASSES

POSIÇÃO TOPOGRÁFICA	PARÂMETROS
Cristas	> 1 desvio padrão
Vertentes Superiores	> 0,5 e \leq 1 desvio padrão
Vertentes Intermediárias	> 0 e < 0,5 desvio padrão
Áreas Planas	Declividade < 5° \geq - 0,5 e \leq 0 desvio padrão
Vertentes Inferiores	Declividade \geq 5° \geq - 1 e < 0,5 desvio padrão
Vales	Declividade \geq 5° < - 1 desvio padrão

FONTE: SILVEIRA (2015), adaptado de WEISS (2001)

Os valores resultantes do IPT e atribuídos para as classes de relevo relacionam-se diretamente ao valor do raio adotado (SILVEIRA, 2015). A definição do raio foi baseada em critérios taxonômicos definidos por Dikau (1990), que atribui valores de área as ordens de grandeza do relevo. Essa classificação consiste num sistema em três níveis hierárquicos resultantes da combinação de atributos topográficos calculados a partir de uma janela móvel definida, são eles: declividade; gradiente altimétrico; e predomínio de áreas planas ou declives suaves. O raio adotado foi de 100 m ou 100 pixels.

6.2 CHUVAS INTENSAS

6.2.1 Modelo de Fendrich (2003)

Para a utilização prática de dados de chuva em trabalhos de drenagem de superfície, faz-se necessário conhecer a relação entre as quatro características fundamentais da chuva: sua intensidade, duração, frequência e distribuição, (FENDRICH, 2003). A determinação dessa relação é feita a partir de dados históricos de estações meteorológicas e postos pluviográficos.

A relação entre Intensidade, Duração e Frequência pode ser representada graficamente ou por meio de uma equação, que tem como fórmula geral:

(Eq. 2)

$$i = \frac{K \times Tr^m}{(t + b)^n}$$

Onde:

i = Intensidade máxima da precipitação, mm/h;

Tr = tempo de recorrência, anos;

t = tempo de duração da chuva, min; e,

K, b, m e n = Parâmetros relativos à estação pluviográfica.

As precipitações máximas utilizadas para o estabelecimento das séries anuais foram as de durações iguais a: 10min, 20min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h e 24h. Já os tempos de recorrência utilizados foram: 2, 3, 5, 10, 20 e 50 anos.

Fendrich (2003) definiu as equações de chuvas intensas para 34 municípios do Paraná e através destas calculou a equação geral para o estado. Pato Branco é uma das cidades contempladas por este autor.

Para a obtenção dos parâmetros relativos a cada estação pluviográfica, foram analisados os dados obtidos da leitura dos pluviogramas das séries históricas das estações e sobre estes foram aplicados os devidos ajustes de acordo com o método dos mínimos quadrados.

O fator de frequência (K) foi obtido através da análise estatística das intensidades de precipitação, considerando as alturas de precipitação para os tempos de recorrência predeterminados.

(Eq. 3)

$$K = (0,7797 \times b) - 0,45$$

O parâmetro “b” é uma constante que transforma as curvas obtidas para cada tempo de recorrência em uma reta. Para a obtenção dos parâmetros b, m e n, foi adotada uma sequência de procedimentos com o auxílio dos programas computacionais TESTE e REGRESS onde faz-se a variação de “b” desde o menor valor encontrado até o maior, considerando os dados obtidos da intensidade de precipitação procurando estabelecer um conjunto de parâmetros que forneçam o melhor grau de correlação e o menor erro de estimativa.

A estação pluviográfica de Pato Branco registrada pela Agência Nacional das Águas (ANA) sob o código 02652035 localiza-se na cota de elevação 700m e é coordenada pelo IAPAR. A equação de chuvas intensas de Pato Branco foi determinada em 1991, para essa equação foram observados os dados da estação local no período de 1979 a 1989, totalizando 11 anos. Substituindo os valores estabelecidos na equação 2, tem se:

(Eq. 4)

$$i = \frac{879,43 \times Tr^{0,152}}{(t+9)^{0,732}}$$

Este trabalho utiliza a metodologia proposta por Fendrich (2003) para definição dos índices pluviométricos críticos para Pato Branco. Foram considerados os tempos de recorrência de 1 a 20 anos e os tempos de duração em minutos de 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 (3h), 360 (6h), 720 (12h), 1440 (24h), 2880 (48h), 4320 (72h) e 5760 (96h).

6.2.2 Chuva Crítica Segundo Parâmetros Hidrológicos e Geotécnicos

A investigação do teor de chuva capaz de iniciar um processo de escorregamento, através de características geotécnicas de uma vertente e o ciclo hidrológico local considera obrigatoriamente a influência que a vertente exerce no processo de instabilidade do sistema. Para a determinação da intensidade crítica da

chuva, deve-se considerar a vertente em sua condição de equilíbrio limite, ou seja, fator de segurança igual a 1,00.

O modelo de Dietrich e Montgomery (1998) indica o teor de chuva (Q_c) necessário para que a vertente atinja o índice de FS igual a 1,00, onde a ruptura é iminente. Segundo Fiori e Carmignani (2009), a análise da chuva via Q_c está condicionada a infiltração de toda a chuva precipitada sobre a vertente, além de considerar obrigatoriamente outros parâmetros no processo de instabilidade da encosta, são eles: a influência da vegetação, a transmissividade do solo (m^2/dia), a área de contribuição da bacia (m^2), o tempo de precipitação (min) e a vazão da chuva (mm/h).

Assim como a modelagem do FS utiliza equações distintas para cenários com ou sem vegetação, a definição do índice pluviométrico crítico (Q_c) acontece a partir de duas equações. Se considerada a presença de vegetação:

(Eq. 5)

$$Q_c = \frac{T_m \text{ seni}}{a/b} \left[\frac{C_s + S_r + T(\text{sen}\theta \tan\phi + \text{cos}\theta) - \sigma_{ve}}{\gamma_a h \text{cos}^2 i \tan\phi} + \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi} \right) \left(\frac{\gamma_{nat}}{\gamma_a} + \frac{\sigma_a}{h\gamma_a} \right) \right]$$

Onde:

Q_c = Chuva crítica;

T_m = Transmissividade do solo (m^2/dia);

a = Área de contribuição da bacia (m^2);

b = Comprimento da seção da curva de nível (m);

C_s = Coesão do solo (kPa);

S_r = Coesão devido às raízes (kPa);

T = Tensão suportada pelas raízes (kPa);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m^3);

γ_a = Peso específico da água (kN/m^3);

h = Espessura do perfil de solo, perpendicular a vertente (cm);

i = inclinação da vertente (graus);

ϕ = Ângulo de atrito interno entre partículas de solo (graus);

θ = Ângulo raiz/plano de escorregamento (graus);

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na copa das árvores (kPa).

Se a vertente não tiver vegetação, a equação acima, pela anulação dos termos referentes à vegetação (S_r , T , σ_a e σ_{ve}), transforma-se em:

(Eq. 6)

$$Q_c = \frac{T_m \operatorname{sen} i}{a/b} \left[\frac{C_s}{\gamma_a h \cos^2 i \tan \Phi} + \frac{\gamma_{nat}}{\gamma_a} \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \Phi} \right) \right]$$

Onde:

Q_c = Chuva crítica;

T_m = Transmissividade do solo (m^2/dia);

a = Área de contribuição da bacia (m^2);

b = Comprimento da seção da curva de nível (m);

C_s = Coesão do solo (kPa);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m^3);

γ_a = Peso específico da água (kN/m^3);

h = Espessura do perfil de solo, perpendicular a vertente (cm);

i = inclinação da vertente (graus);

Φ = Ângulo de atrito interno entre partículas de solo (graus);

Escorregamentos podem ocorrer em pontos específicos da vertente influenciados por detalhes locais, como interação de fluxo em solos coluviais próximo à superfície do terreno, maior espessura local de solo ou, então a maiores alturas da zona saturada. A medida que aumenta a espessura do solo pela ação do intemperismo, ou aumenta a altura da zona saturada, em períodos mais longos ou intensos de chuva, aumenta gradualmente a probabilidade de ruptura da vertente.

O cálculo de Q_c permite utilizar a equação de chuvas intensas de Fendrich (2003), que considera o tempo de duração da chuva, e através desta, pode-se fazer uma previsão de tempo de recorrência (Tr) de eventos de escorregamento substituindo i por Q_c . Utilizando a equação de chuvas intensas para Pato Branco, tem-se:

(Eq. 7)

$$Q_c = \frac{879,43 \times Tr^{0,152}}{(t + 9)^{0,732}}$$

Outra análise interessante é que conhecendo o Q_c capaz de desencadear movimentos de massa naturais numa dada vertente e em posse dos índices medidos no momento da ruptura dos escorregamentos ali registrados, é possível inferir se tais eventos ocorram por condicionantes prioritariamente naturais, ou por influência antrópica. O método de análise é comparativo entre o momento real da ruptura e o limite previsto para o cisalhamento natural do talude segundo Q_c .

6.3 TRATAMENTO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

O banco de dados utilizado para as análises horárias que antecederam os eventos registrados em Pato Branco, conta com dados levantados entre os anos de 1998 e 2018 (SIMEPAR, 2018), e no período de 2014 a 2018 (CEMADEN, 2018). Inicialmente as informações foram segregadas em períodos (meses e dias) e posteriormente classificadas de acordo com o grau de interesse da pesquisa, ou seja, registros pluviométricos dos meses em que foram registrados os escorregamentos analisados, e seus subsequentes dados diários e horários. Foram então separados os dias com registro de chuva, ainda que insignificantes para a deflagração de movimentos de massa, em seguida se deu a identificação dos dias em que o município registrou a ocorrência de escorregamentos de solo.

A partir de então os dados foram trabalhados em sucessivas tabelas e gráficos em compilações de horas e dias antecedentes ao ocorrido para que se pudesse representar os mais distintos cenários de combinação dos fatores chuva e tempo.

A figura 6.2 representa a análise dos dados pluviométricos do mês de dezembro de 2015, incluindo o ETS registrado em dia 10. A segunda coluna contém o teor de chuva diário medido na estação Pato Branco. As demais colunas contemplam a verificação dos acumulados hídricos que antecederam o evento, a análise se deu de forma aleatória considerando diferentes composições de períodos em que se teve registro de chuva. O campo com indicação de cor alaranjada representa o dia da ruptura e o índice pluviométrico acumulado na data e em amarelo encontra-se o acumulado hídrico em 48 horas.

Após a definição dos dias anteriores aos eventos em que se teve registro de chuva, fez a verificação do teor hídrico acumulado nas horas que antecederam a ruptura. O número de horas contabilizado não seguiu um padrão pré-estabelecido, pois cada evento apresenta um registro temporal específico e picos de intensidade variável. Para o controle da pesquisa considerou-se o total acumulado em até 24 horas (Figura 6.3).

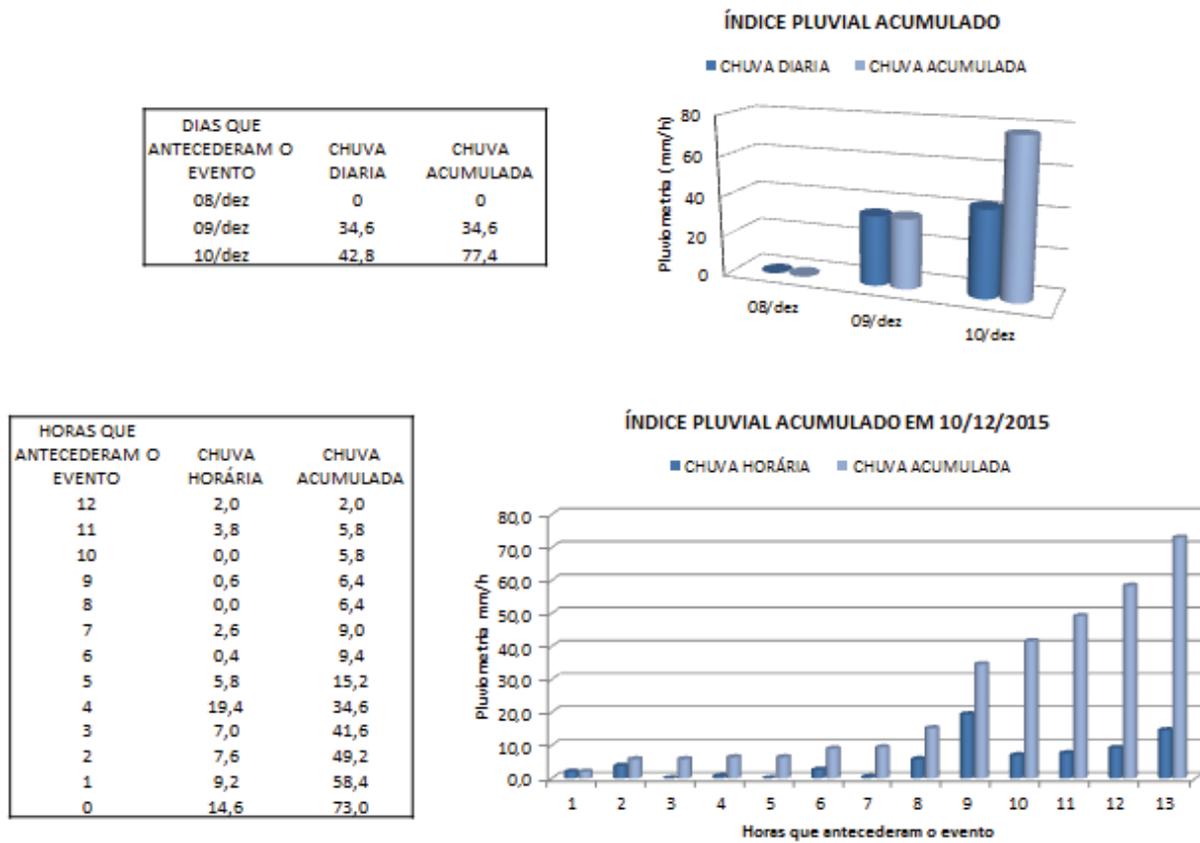
FIGURA 6.2 - EXEMPLOS DA COMPILAÇÃO DE DADOS EM TABELAS REALIZADA PARA CADA EVENTO REGISTRADO

DEZEMBRO	MM/DIA	ACUMULADO POR PERÍODO		
01/dez	0			
02/dez	21.600mm	44.400mm	124.800mm	232.000mm
03/dez	3.800mm			
04/dez	19.000mm			
05/dez	0			
06/dez	3.000mm	3.000mm		
07/dez	0			
08/dez	0			
09/dez	34.600mm	77.400mm	159.600mm	
10/dez	42.800mm			
11/dez	0		154.600mm	
12/dez	32.200mm	82.200mm		
13/dez	18.200mm			
14/dez	0.200mm			
15/dez	31.800mm			
16/dez	0			
17/dez	0			
18/dez	16.800mm	72.400mm	157.200mm	
19/dez	55.600mm			
20/dez	0			
21/dez	0			
22/dez	0			
23/dez	15.200mm			
24/dez	3.800mm			
25/dez	0.200mm			
26/dez	5.800mm			
27/dez	19.600mm	84.000mm		
28/dez	42.600mm			
29/dez	21.800mm		132.200mm	
30/dez	10.200mm			
31/dez	38.000mm			

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

Na figura 6.3 encontram-se exemplos dos gráficos produzidos a partir dos dados de precipitação. O escorregamento registrado em 10 de dezembro de 2015 ocorreu após 12 horas de chuva, sendo o pico de maior intensidade verificado nas 6 horas que antecederam a ruptura.

FIGURA 6.3 - ANÁLISE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO



FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

Após combinados, as tabelas e gráficos gerados a partir da base de dados foram analisados juntamente aos dados obtidos pelo modelo de Fendrich (2003). Para tal verificação os dados foram agrupados considerando o dia de maior incidência de chuva, sendo o índice verificado somado ao registro das 24 horas antecedentes, 48h, 72h e 96h sucessivamente.

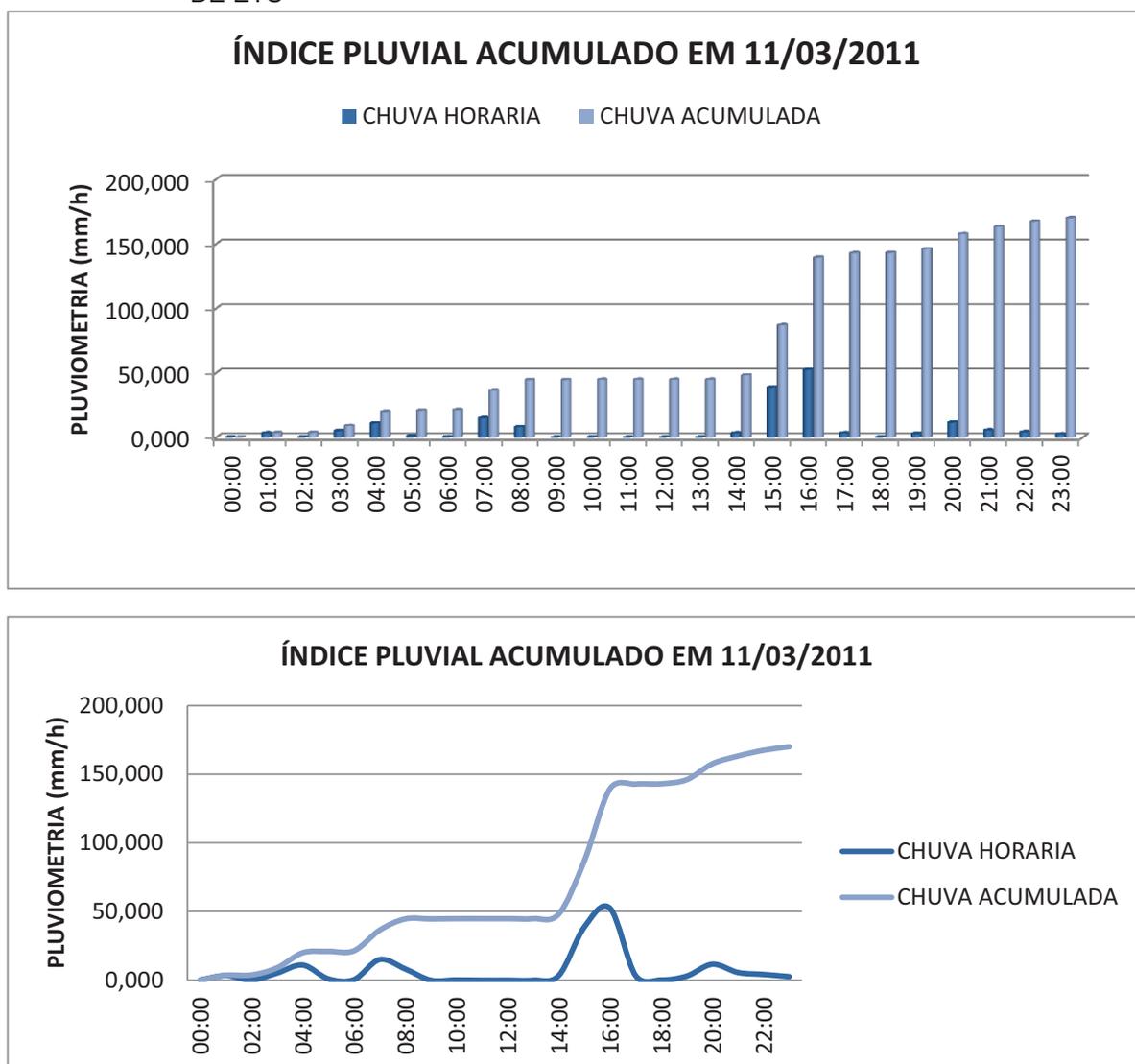
Em posse dos teores máximos acumulados no prazo de até 96h, foram identificados os picos horários de cada evento, ou seja, período em horas durante um único evento em que a intensidade da chuva se sobressaiu consideravelmente. Concluída esta etapa foi possível estabelecer através de relação matemática o índice pluviométrico por tempo pré-determinado (mm/min) e o consecutivo tempo de retorno previsto para cada evento.

Foram considerados ainda os dias cujos registros de chuva apresentaram capacidade para deflagração de movimentos de massa, porem não houve qualquer

registro de eventos desse tipo. Foram realizadas as mesmas análises com a sequência acima descrita de elaboração de tabelas e sucessivos gráficos.

A Figura 6.4 apresenta os gráficos com o acumulado hídrico registrado em 11 de março de 2011. Nessa data ocorreu um evento de chuva anômalo com a precipitação de 92 mm em apenas duas horas.

FIGURA 6.4 - COMPILAÇÃO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS PARA OS DIAS SEM REGISTRO DE ETS



FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

A criticidade dos episódios de chuva que desencadearam os escorregamentos e o tempo de recorrência de precipitação de mesma intensidade e

tempo foram definidos para todas as datas contemplados pela pesquisa, com e sem registros de escorregamentos translacionais de solo.

A pesquisa apreciou ainda a comparação dos comportamentos dos ciclos anuais de pluviosidade com as médias históricas mensais registradas entre os anos de 1981 e 2010. Os dados de ciclos de chuva considerados foram produzidos e disponibilizados pelo Centro de Previsão de tempo e estudos Climáticos (CPTEC/INPE) para o monitoramento climático das chuvas mensais no Brasil. O território nacional foi dividido em 124 regiões ou boxes de dimensão $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ de latitude e longitude.

Para cada região, foram levantados dados diários e mensais de chuva no período analisado e estes foram apresentados em gráficos do tipo Boxplot (representação estatística que segrega os valores analisados em quartis). Um gráfico boxplot é composto de uma caixa e duas hastes, na qual a linha central da caixa delimita a mediana do conjunto de dados (valor que divide os dados em duas metades, com 50% dos dados acima desse valor e 50% dos dados abaixo desse valor). A linha inferior da caixa marca o quartil inferior (Q1), que delimita o valor que deixa 25% dos dados abaixo desse valor, e a linha superior marca o quartil superior (Q3) que delimita o valor que deixa 75% dos dados abaixo desse valor. As hastes inferiores e superiores marcam, respectivamente, os valores de $Q1 - 1.5IQR$ e $Q3 + 1.5IQR$, sendo IQR o intervalo interquartil ($IQR = Q3 - Q1$). Os pontos fora dos limites das hastes são classificados como valores extremos (INPE, 2014).

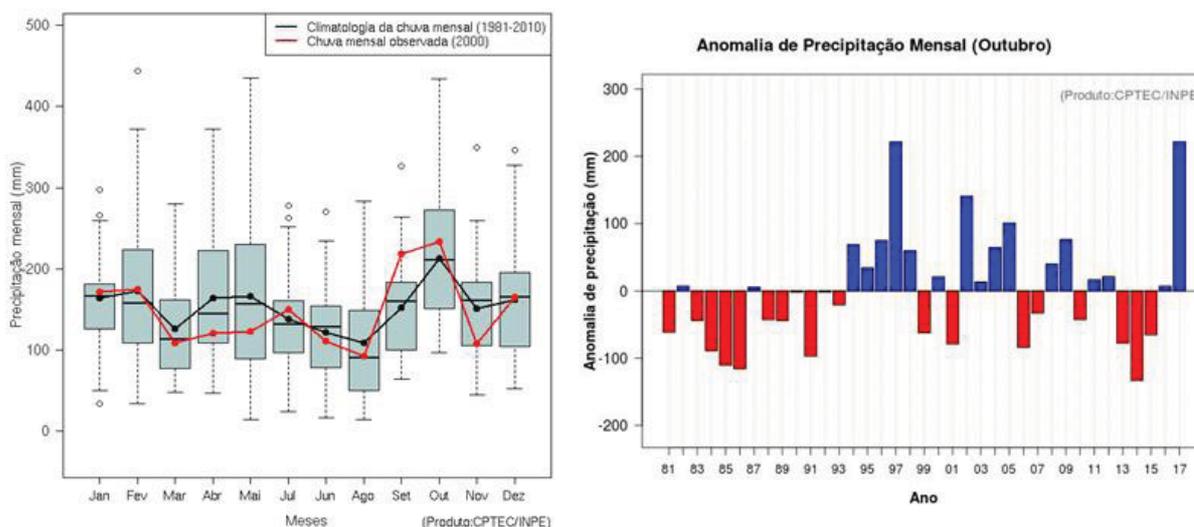
Foram separados os intervalos de interesse, ou seja, os dados de precipitação diários dos meses em que ocorreram escorregamentos, e as médias mensais dos respectivos anos. Cada gráfico do tipo Boxplot contempla os intervalos, em caixas, das médias mensais dos 29 anos considerados pelos pesquisadores, além de apontar as precipitações extremas representadas por círculos vazados. Sobre as caixas intervalais encontra-se uma linha contínua de cor preta que indica a média climatológica da chuva mensal para o período estudado, e uma linha contínua vermelha que indica os totais mensais para cada um dos anos considerados nessa pesquisa.

Já os gráficos em barras que consistem nas anomalias de precipitação. Estes representam a evolução interanual da anomalia de precipitação mensal no período de janeiro a dezembro do ano de interesse. O gráfico destaca, em barras de

cor azul, os períodos em que a precipitação mensal superou a média histórica (anomalia positiva), e em barras de cor vermelha os períodos em que a precipitação foi menor que a média histórica (anomalia negativa). Para o cálculo da anomalia de precipitação, subtraiu-se o valor da precipitação de um determinado mês, do valor médio climatológico (1981-2010) referente ao mês em questão.

Os dados meteorológicos considerados para a elaboração dos gráficos são específicos para cada região. A região sudoeste do estado do Paraná é contemplada pelo box 115, portanto as considerações sobre os resultados apresentam igualmente abrangência regional (Figura 6.5).

FIGURA 6.5 - EXEMPLO DOS GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ



FONTE: Modificado de CPTEC/INPE (2018)

A figura 6.8 retrata no gráfico boxplot a análise estatística dos dados de chuva no ano 2000, e no gráfico em barras evidencia as anomalias (mm/mês) registradas nos meses de outubro de 1981 a 2018. Ambos os gráficos evidenciam que no mês de outubro do ano em questão, o registro pluviométrico regional superou em cerca de 30mm a média prevista para o período, sem registros de eventos anômalos em escala regional.

6.4 INVENTÁRIO DE CICATRIZES

Os episódios catalogados representam escorregamentos de pequeno porte com indícios de interferência antrópica. A dimensão das cicatrizes e a ausência de imagens de satélite em escala compatível impossibilitou um maior detalhamento dos eventos.

As localizações dos escorregamentos variam de áreas consideradas planas a encostas muito íngremes (relevo escarpado), segundo o modelo digital de declividade da área confeccionado com dados planialtimétricos de 2016. Isso ocorre porque o relevo é mutável e em ambiente urbano encontra-se altamente suscetível a alterações antrópicas.

Portanto é preciso considerar que a declividade do mapa é aparente e pode não retratar a realidade do terreno no instante das rupturas tanto pretéritas quanto posteriores a aferição da base. Vale lembrar ainda que a declividade tem escala de detalhe métrica, logo as modificações topográficas em decorrência de obras de engenharia como cortes e aterros são visíveis na modelagem.

6.5 SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTO DE SOLO – FATOR DE SEGURANÇA

A definição das áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais de solo se deu através do modelo determinístico Fator de Segurança com base na teoria do equilíbrio limite.

Os mapas foram gerados no *software* ArcGIS 10.4.1 através da ferramenta álgebra de mapas. O modelo é alimentado por equações que correlacionam os parâmetros físicos e geotécnicos dos solos e características específicas da vertente analisada, como presença e tipo de vegetação, com diferentes cenários de saturação hídrica do perfil de solo.

Segundo Silveira *et al.*, (2012) o estudo da estabilidade considera a condição de equilíbrio entre o peso do material sobre a vertente, a força devido o

fluxo de água e a resistência ao atrito, e envolve um conjunto de procedimentos que visam a determinação de um índice, ou de uma grandeza, que permita quantificar o grau de estabilidade das vertentes aos processos morfodinâmicos.

O fator de segurança é um modelo matemático desenvolvido para comparar a estabilidade de uma vertente diante de diversos cenários de equilíbrio de forças. Fiori e Carmignani (2009) tratam de forma detalhada diversos métodos determinísticos para o cálculo do fator de segurança em diferentes perfis de vertentes. As equações propostas por esses autores descrevem o fator de segurança em função de propriedades físicas e mecânicas dos solos, relevo, escoamento hídrico e tipos de cobertura vegetal.

Para estes autores, um talude é uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças exercidas pelo peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. E o fator de segurança é definido por eles, como a razão entre as forças resistentes e as forças solicitantes ou atenuantes em um escorregamento.

(Eq. 8)

$$FS = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças solicitantes}}$$

O estudo da estabilidade de taludes condicionado pela teoria do equilíbrio limite deve necessariamente considerar a atuação desses 3 conjuntos de forças, visto que os dois primeiros se somam e tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto o último atua como um freio, barrando a movimentação (D'ARÓZ, 2015).

Os modelos de FS são gerados através de álgebra de mapas mediante a inserção de dados numéricos combinados com modelos digitais em formato *raster*. Cada modelo de fator de segurança tem por base a declividade da área em grau, os parâmetros geotécnicos do solo, uma dada saturação hídrica do perfil de solo estabelecido, além dos fatores que influenciam no cálculo da estabilidade que são selecionados de acordo com a área de estudo. Quanto maior o número de fatores considerados, mais preciso é o modelo produzido.

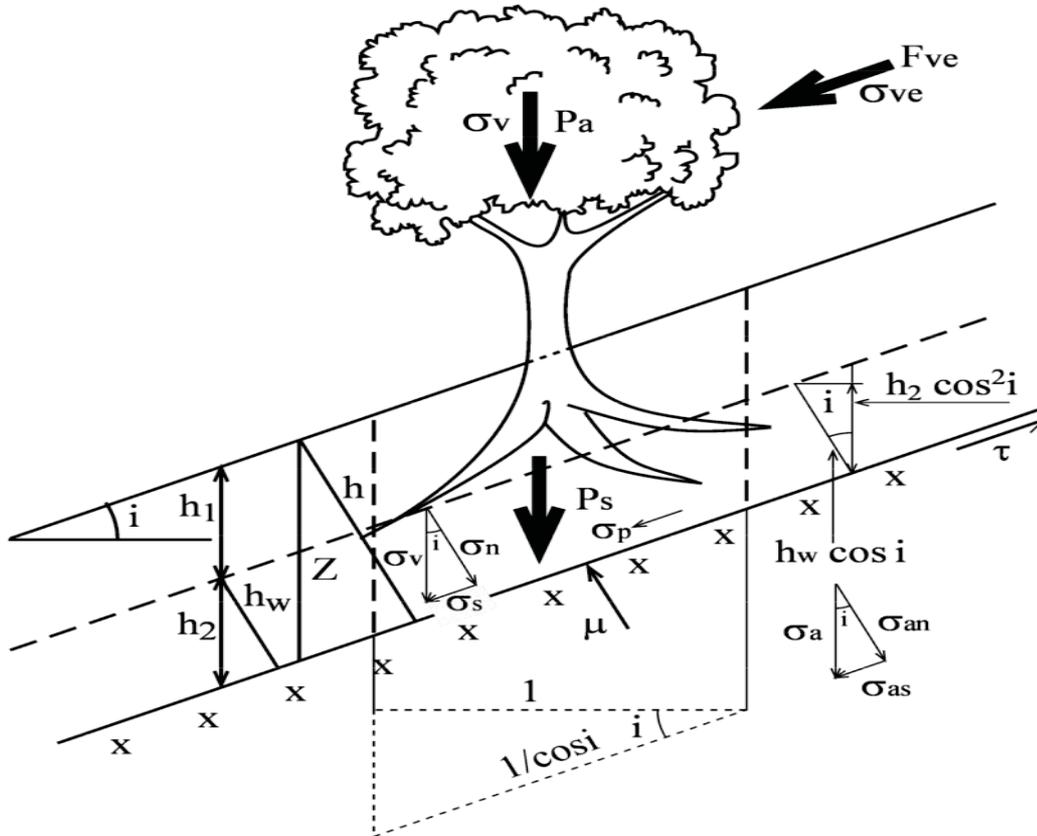
Para a elaboração dos modelos de FS é necessário que se conheçam todas as variáveis atuantes no processo de estabilidade de uma encosta. A definição do índice de segurança de um talude de extensão infinita considera os seguintes parâmetros: a espessura do solo, coesão, ângulo de atrito interno, índices físicos e propriedades dos solos, a presença de água no solo e de vegetação na encosta.

Em vertentes infinitas com presença de cobertura vegetal onde o nível freático encontra-se a uma profundidade h_1 da superfície e uma distância h_2 da base da camada de solo, as forças exercidas pela presença de vegetação devem ser consideradas na análise da estabilidade da encosta. São elas: a força do vento que atua sobre a copa das árvores, pressão exercida pelo peso das árvores sobre o solo, e a força de atirantamento das raízes (Figura 6.6).

Por se tratar de um modelo matemático, o resultado de FS obtido para cada pixel é quantitativo. Para a visualização do modelo em classes de estabilidade é preciso agrupar os valores encontrados de acordo com os índices estabelecidos por um parâmetro. Para esse estudo foi adotado o padrão utilizado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), que é o aceito em todo o território nacional para a segurança de encostas e taludes rodoviários (DNER, 1973; e DNIT, 2010). Este considera qualquer perfil com FS igual ou inferior a 1,5 encontra-se potencialmente instável.

A condição especial de equilíbrio limite corresponde a um FS de valor igual a 1.00. Valores iguais ou inferiores a este, indicam que o escorregamento de solo é eminente de acordo com Fiori e Carmignani, (2009) e são classificados como áreas de muito alta suscetibilidade a ETS. Partindo desse pressuposto, os perfis com FS entre 1,15 e 1,5 serão considerados moderadamente suscetíveis a escorregamentos. Quanto maior for o valor acima da unidade, mais estável é a vertente e por consequência, menor a suscetibilidade de ocorrência desse processo (SILVEIRA *et al.*, 2012a).

FIGURA 6.6 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE DE VERTENTES NA PRESENÇA DE VEGETAÇÃO



FONTE: FIORI E CARMIGNANI (2009)

6.5.1 Cenários de Saturação Hídrica do Solo

Os resultados cartográficos produzidos simulam oito cenários distintos de saturação hídrica de solo, com e sem a influência da vegetação. Os índices de saturação de solo, ou cenários apresentados nos mapas, foram definidos através da compilação dos dados de Tabalipa (2008). Foram utilizados os dados amostrais de solo e suas respectivas análises laboratoriais.

Para determinar o comportamento geotécnico de cada tipo de solo da bacia do Rio Ligeiro, Tabalipa (2008) realizou diversas campanhas de campo com descrição e classificação *in situ* de perfis de solo, além de coletas de 9 amostras de solo deformadas e indeformadas para ensaios laboratoriais que incluíram: análise granulométrica, limites de Atterberg (limite de liquidez e plasticidade), teor de

umidade, cisalhamento direto (para obtenção do peso específico aparente, coesão e ângulo de atrito interno) (Figuras 6.7 e 6.8). As coletas foram realizadas de forma padronizada segundo a norma NBR 9604/86, e o manual de procedimento do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME).

FIGURA 6.7 - PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO DEFORMADAS E INDEFORMADAS



FONTES: Adaptado de TABALIPA (2008).

LEGENDA: a) Coleta de amostras de Cambissolo Eutrófico.

b) Coleta de amostras de Latossolo Álico.

FIGURA 6.8 – PADRONIZAÇÃO DAS DESCRIÇÕES REALIZADAS IN SITU

PONTO 1	AMOSTRA	2.0269.06 (A)		ALTITUDE (m)	TIPO DE SOLO:	LATOSSOLO (Latosolo Roxo Álico)*
	coordenadas	x	y	799	classificação conforme EMBRAPA (1999)	
		331.004	7.101.504			
DESCRIÇÃO <i>in situ</i>						
				<p>Amostra: Indeformada e Deformada</p> <p>Localização: UTFPR Relevo: Ondulado Situação: Terço médio da encosta, boa drenagem e erosão não aparente Uso atual: campo Cor: Vermelho escuro 2,5 YR 4/6 estrutura granular moderada e ligeiramente plástico, friável Textura: Argilosa Profundidade de amostragem: 1,5m</p>		

FONTE: TABALIPA (2008)

Para a definição dos cenários de saturação das encostas foram considerados os valores de umidade natural das amostras de solo apresentados nos ensaios de teor de umidade e os índices de vazios, que permitiram o cálculo da saturação natural dos solos. O menor valor atribuído para um perfil natural de solo foi de 29,7% de água, com 1,25 de vazios.

Partindo desse dado e estabelecendo que os alguns pontos amostrados representam porções declivosas da área de estudo e estavam estáveis no momento das coletas, foram estabelecidos então 6 cenários de saturação das encostas entendidos como plausíveis para a região 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 70% saturado. Além destes foram considerados os dois cenários hipotéticos que representam os extremos de saturação 0% e 100%.

6.5.2 Parâmetros Considerados

A confecção dos mapas suscetibilidade a escorregamento translacional de solo se deu em ambiente SIG, como a utilização de parâmetros geotécnicos dos solos obtidos nos ensaios laboratoriais realizados por Tabalipa (2008).

Os ensaios de parâmetros geotécnicos em laboratório realizados pelo autor obedeceram às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme Tabela 15.

TABELA 15 - NORMATIZAÇÃO UTILIZADA EM ENSAIOS LABORATORIAIS

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	NBR 7181/84
Teor de umidade (H)	NBR 6457/86
Limite de liquidez (LL)	NBR 6459/84
Limite de plasticidade (LP)	NBR 7180/84
Massa específica	DNER DPT M 93-63
Cisalhamento direto	DRAINED DIRECT SHEAR TEST em 11 10-2-1906/70
Permeabilidade (K)	NBR 14545/00

FONTE: TABLIPA (2008)

A definição da área quanto à suscetibilidade a ETS foi realizada para ambos cenários de cobertura vegetal, ou seja, presença e ausência. A classificação de ambos modelos é a mesma, a diferença entre eles está na equação utilizada na álgebra de mapas.

Se considerada a presença de vegetação, uma vez determinados todos os parâmetros de resistência dos solos e características morfológicas das vertentes, estes são acrescidos das forças atuantes devido à cobertura vegetal. Nesse caso o peso específico do solo considerado será apenas o natural. O cálculo o FS é fornecido pela seguinte equação (FIORI e CARMIGNANI, 2009):

(Eq. 9)

$$FS = \frac{Cs + \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_a}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \Phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}}$$

Onde:

FS = Fator de Segurança;

Cs = Coesão do solo (kPa);

h_a = Altura da água no solo (solo saturado), perpendicular a vertente (cm);

h = Espessura do perfil de solo, perpendicular a vertente (cm);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m³);

γ_a = Peso específico da água (kN/m³);

i = inclinação da vertente (graus);

Φ = Ângulo de atrito interno entre partículas de solo (graus).

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na copa das árvores (kPa);

Se considerada a ausência de vegetação, uma vez determinados todos os parâmetros de resistência dos solos e características morfológicas das vertentes, estes são acrescidos apenas dos condicionantes hídricos, e além do peso específico natural do solo, será considerados o peso específico das partículas submersas. O cálculo o FS é fornecido pela seguinte equação (FIORI e CARMIGNANI, 2009):

(Eq. 10)

$$FS = \frac{Cs + (h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub}) \cos^2 i \tan \Phi}{(h_1 \gamma_{nat} + h_2 \gamma_{sub} + h_2 \gamma_a) \sin i \cos i}$$

Onde:

FS = Fator de Segurança;

C_s = Coesão do solo (kPa);

h_1 = Espessura do solo seco, perpendicular a vertente (cm);

h_2 = Espessura do solo saturado, perpendicular a vertente (cm);

γ_a = Peso específico da água (kN/m³);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m³);

γ_{sub} = Peso específico do solo submerso (kN/m³);

i = inclinação da vertente (graus);

Φ = Ângulo de atrito interno entre partículas de solo (graus).

Na área de estudo afloram ao menos 5 tipos de distintos de solo, sendo cada um compatível com características específicas de relevo. Na inexistência de um mapa que delimite os tipos de solo e contemple toda a área urbana de Pato Branco, foram considerados somente os dados dos tipos de solo mais abundantes de acordo com o mapeamento de solos da EMBRAPA de 1999, são eles latossolos vermelho álico com 69% e cambissolos eutróficos com 13,18% (Tabela 01).

Considerando somente as amostras de latossolos e cambissolos foram separadas 7 das 9 amostras de solos de Tabalipa (2008). Para efeitos de cálculo no presente trabalho, foram extraídas das amostras, as médias dos parâmetros de resistência estabelecidos nos ensaios laboratoriais e da profundidade de coleta das amostras (Tabela 16).

TABELA 16 - SOLOS MAIS REPRESENTATIVOS DA ÁREA URBANA DE PATO BRANCO SEGUNDO O MAPEAMENTO DE SOLOS DA EMBRAPA DE 1999

Pedotipos	Esp. Solo (Z)	Coesão (kPa)	A. Atrito (°)	γ_{nat}	γ_{sat}	γ_{sub}
Latossolo Verm. Álico	2,00 m	13,21	22,98	11,8	15,56	5,56
Latossolo Verm. Álico	2,50 m	3,78	21,60	14,7	16,98	6,98
Latossolo Verm. Álico	2,50 m	7,82	20,86	13,0	15,72	5,72
Latossolo Verm. Álico	2,50 m	15,23	18,37	17,0	17,18	7,18
Cambissolo Eutrófico	0,75 m	7,90	16,49	16,1	17,97	7,97
Cambissolo Eutrófico	0,75 m	5,15	15,48	13,8	16,5	6,50
Cambissolo Eutrófico	0,75 m	2,69	22,54	16,6	18,92	8,92
Médias	1,70 m	7,97	19,76	14,71	16,98	6,98

FONTE: Modificado de TABALIPA (2008)

Os demais parâmetros relacionados e presença de vegetação considerados nessa pesquisa foram extraídos da literatura (Tabela 17).

O peso exercido pelas árvores sobre a vertente pode ser extraído a partir do número de árvores pela área da vertente. A pressão exercida pelo peso das árvores sobre uma encosta de inclinação (i) é obtida multiplicando o peso das arvores pela área de abrangência das raízes (TABALIPA, 2008).

(Eq. 11)

$$\sigma_a = Pa \cdot \cos i$$

Diversos pesquisadores calcularam os valores de σ_a , sendo os índices estabelecidos em torno de 2,5 kPa por Bishop e Stevens (1964), 5,2 kPa segundo Wu *et al.*, (1979), 3,0 kPa na Serra do Mar de acordo com Wolle e Pedrosa (1981), e os encontrados por Kozciak (2005) de 3,6 kPa para florestas e 2,0 kPa para capoeiras. Em sua pesquisa, Tabalipa (2008) aplicou os valores definidos por Kozciak (2005).

Para esta pesquisa o valor considerado de σ_a foi de 3,6 kPa que retrata um cenário extremo de atuação desse fator nos condicionantes a mobilidade da encosta.

Para Fiori e Carmignani (2009) a pressão exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal pode ser transmitida ao solo como uma pressão adicional. Se o vento sopra na inclinação da vertente, a força de arrasto do vento (F_{ve}) deverá ser adicionada às forças mobilizantes, reduzindo a resistência à ruptura. Essa força foi verificada em experimentos com florestas modelo em túneis de vento, e o esforço cisalhante é dado por:

(Eq. 12)

$$\sigma_{ve} = C \left(\frac{\rho \mu_a^2}{2} \right)$$

Onde C é o coeficiente de arrasto do vento e situa-se entre 0,30 e 0,15 na copa de uma floresta (Wu *et al.*, 1979), ρ é a densidade da massa de ar, equivalente a 0,00123 Mg/m³ quando tomado no nível do mar de acordo com Styczen e Morgan (1995), e μ a velocidade do vento em km/h. O valor da σ_{ve} de qualquer maneira é pequeno e não exerce grande influência na estabilidade das vertentes. O efeito das vibrações causadas pela oscilação das árvores não é levado em conta, mas pode ter importância no processo.

A tensão de tração provocada pela ação do vento sobre as árvores pode atuar como uma força favorável à ocorrência de escorregamentos. Análises realizadas por Styczen e Morgan (1995) e Borchardt (2005) revelam que a força do vento somente tem significado para o aumento das forças favoráveis ao movimento, que este sopra na direção do declive da encosta a partir de uma velocidade de 40 km/h.

Para efeitos de cálculo, essa pesquisa considerou o valor de σ_{ve} igual a 0,31 kPa, considerando uma média dos valores atribuídos por Tabalipa (2008), para ventos de 48 km/h em capoeira e florestas (0,2834) e 52 km/h (0,3326) medidos para Pato Branco.

TABELA 17 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A CONFECÇÃO DOS MAPAS DE FS

Espessura	Coesão	A. Atrito	P. Arv.	P. Vent.	P. Esp	P. Esp	P. Esp
h	Cs	Φ	σa	σve	γnat	γsat	γsub
1,70	7,97	19,76	3,6 kPA	0,31 kPA	14,71	16,98	6,98

FONTE: Modificado de TABALIPA (2008)

Para melhor compreensão os dados numéricos de FS foram separados em 5 classes crescentes com intervalos equivalentes a estabilidade da área representada (D'AROZ, 2015). Tais classes estão referenciadas de forma quantitativa e reclassificadas de forma qualitativa, variando de muito alta suscetibilidade (FS < 1,00), até muito baixa suscetibilidade (FS > 2,00) (Tabela 18).

TABELA 18 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO A SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

Classes	Relação Quantitativa	Relação Qualitativa
1	< 1,00	Muito Alta
2	1,01 - 1,15	Alta
3	1,15 - 1,50	Moderada
4	1,50 - 2,00	Baixa
5	> 2,00	Muito Baixa

FONTE: D'ARÓZ (2015)

Os valores de FS menores que 1,00 indicam áreas de instabilidade, em que as forças solicitantes ao movimento são maiores que as resistentes, e assim o talude encontra-se sob risco iminente de ruptura. Valores de FS inferiores a 1,50 indicam áreas de estabilidade reduzida, embora a classificação admita que a vertente encontra-se em equilíbrio por apresentar FS maior que 1,00. Quando o FS medido é superior a 1,50 admite-se que a vertente encontra-se estável e que a probabilidade de ruptura natural da encosta é bastante reduzida. Já quando valores de FS superam o limite de medição 2,00, diz-se que a encosta encontra-se em equilíbrio e seguramente não ocorreram escorregamentos naturais de solo.

Para melhor visualização e comparação de resultados entre áreas com presença e ausência de vegetação, as pranchas de ambos os modelos de FS foram postas lado a lado. Portanto, cada cenário de saturação hídrica contempla duas modelagens de FS, sendo a esquerda de cada prancha representada pela modelagem que considera o solo exposto e a direita a área coberta por vegetação.

7. RESULTADOS PRELIMINARES

7.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

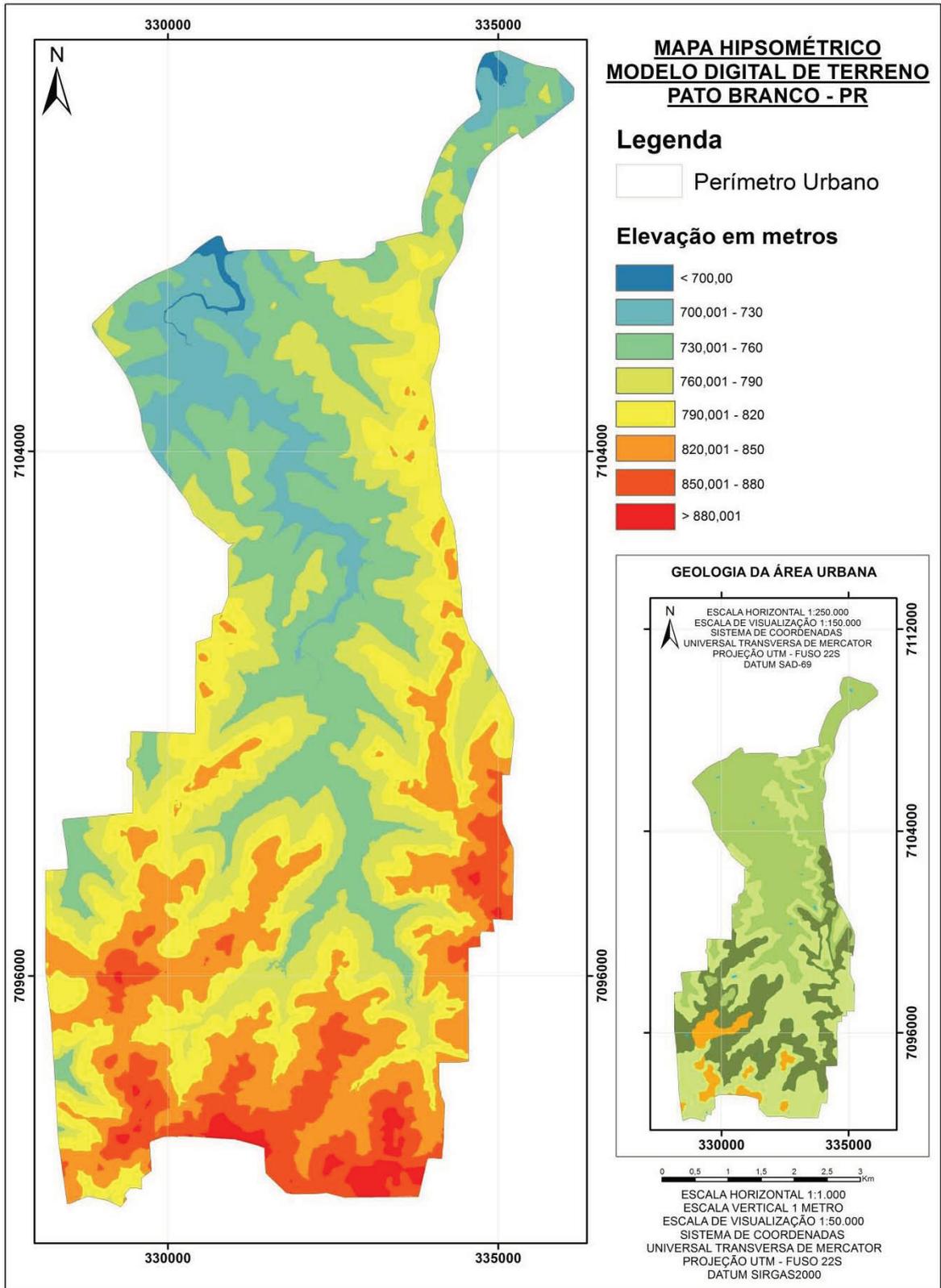
O modelo hipsométrico foi confeccionado a partir dos dados do mapeamento planialtimétrico local em escala horizontal 1:1.000, com resolução espacial de 1 metro.

O MDT foi processado no software ArcGIS versão 10.4.1 (ESRI, 2015), através do interpolador Topo to Raster, com grade regular 3 x 3 pixels que possibilita a estimação de inúmeras variáveis do terreno como declividade, relevo sombreado e curvatura de vertentes.

A altimetria revelou que a área urbana de Pato Branco tem sua porção mais elevada a sul, onde a maior cota registrada é de 914,65 m, enquanto as menores elevações encontram-se no limite do polígono urbano ao norte, com 675,99 m no centro do leito do rio Ligeiro (Figura 7.1). O gradiente altimétrico é de 238,66 m e a cota média estimada para a porção representada é de 795,32 m.

A figura 7.1 apresenta em destaque a representação simplista do mapa geológico da área de estudo (Figura 3.5). A análise do modelo digital de terreno evidencia a correlação existente entre a topografia da área e a geologia local. Mesmo com a divisão do MDT em 8 classes de elevação métrica, as características do relevo são fortemente demarcadas nos contatos das formações geológicas determinadas por Arioli *et al*, (2013), indicando que a geologia é o principal componente formador do relevo da região.

FIGURA 7.1 - MODELO DIGITAL DE TERRENO



FONTE: A autora (2018)

7.2 ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS

7.2.1 Declividade

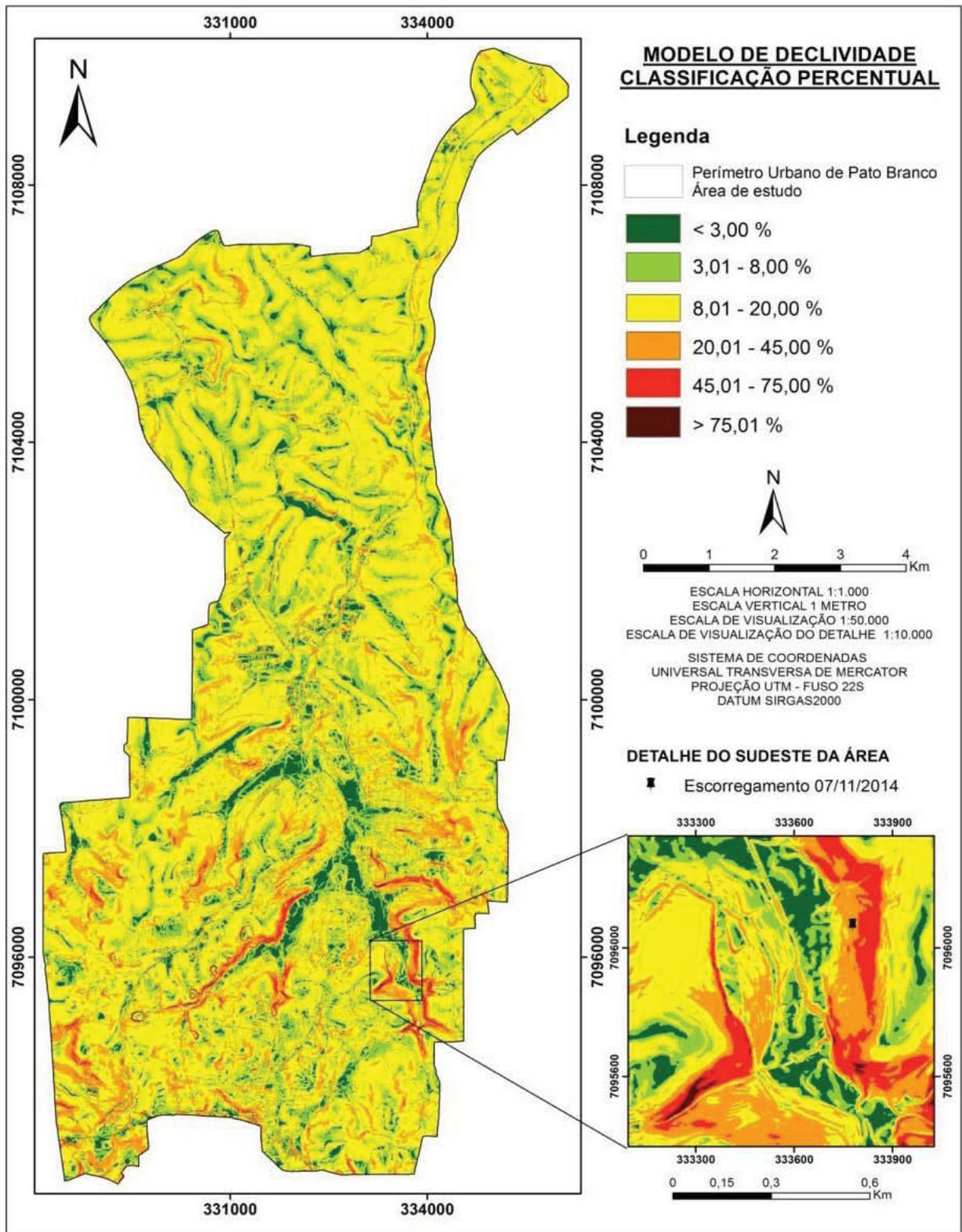
Os mapas da declividade foram elaborados no *software* ArcGis 10.4.1 utilizando a ferramenta "Slope" do "Arctoolbox – spatial analyst tools" tendo como dado de entrada o MDT. A representação do relevo foi classificada em 6 intervalos de declividade, baseados na inclinação percentual do terreno, de acordo com a proposta de EMBRAPA (2006). Para a elaboração dos mapas de Fator de Segurança, as classes de declividade em percentual foram recalculadas para grau (Tabela 13).

A Figura 7.2 representa o modelo final de declividade em percentual. No detalhamento encontra-se o escorregamento registrado em 07/11/2014, cuja localização se dá sobre relevo forte ondulado.

Assim como no MDT, é possível correlacionar a geologia da área (Figura 3.5) com o atributo de declividade. O ponto de maior inclinação aferida pelo modelo foi de 123,44 % ou 50.99°, numa frente de lavra na porção centro-sul da área sobreposta aos litotipos da Formação Candói.

As regiões mais declivosas identificadas pelo modelo estão sobrepostas às rochas do Membro Chopinzinho. Segundo a descrição litológica da Formação Candói, este membro contém brechas hidrotermais entre os derrames de basaltos, litotipo comumente associado a movimentos de massa no Grupo Serra Geral (LICHT *et al.*, 2012), e disjunções colunares, estruturas verticais tabulares de resfriamento rápido que formam fendas na rocha, caminhos preferenciais de infiltração de água.

FIGURA 7.2 – MODELO DE DECLIVIDADE EM PERCENTUAL



FONTE: A autora (2018)

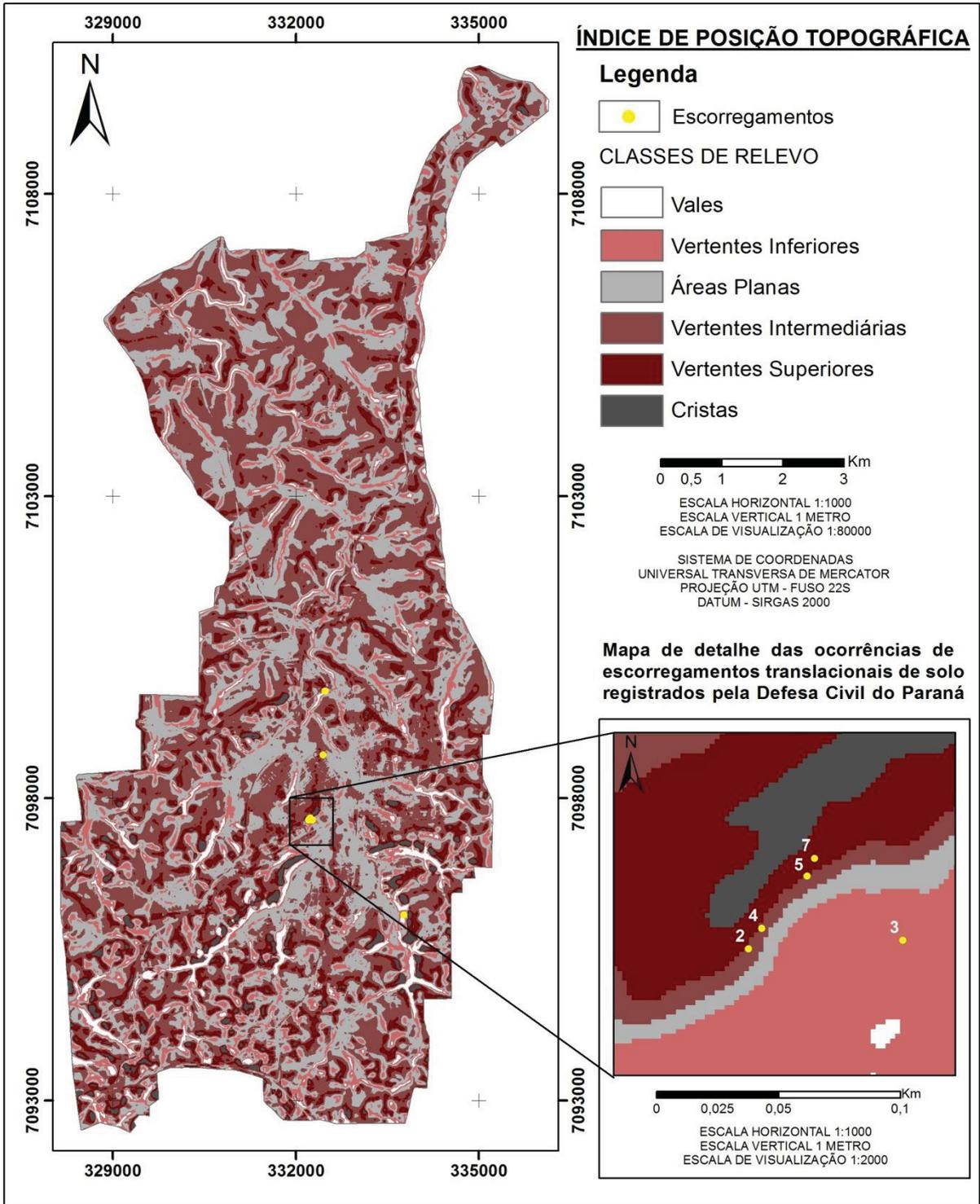
7.2.2 Índice de Posição Topográfica (IPT)

O IPT foi elaborado no software ArcGis 10.4.1, através do processamento do MDT com a ferramenta “focal statistics” localizada no “ArcToolbox – spatial analyst tools – neighborhood”. O IPT é o resultado da média do MDT quando aplicado o algoritmo de Weiss (2001), através da ferramenta álgebra de mapas considerando o raio de 100 m ou 100 pixels.

A classificação dos valores obtidos pelo processamento representam as características posicionais das vertentes, sendo eles: valores positivos, os locais que são mais elevados que a média de seu entorno, caracterizando as cristas; valores negativos, os locais mais rebaixados em relação à vizinhança caracterizando o terço inferior de vertentes e fundos de vale ou depressões; e os valores próximos a zero, as superfícies de declive constante, destacando-se as áreas planas.

A figura 7.3 retrata o Índice de posição topográfica da área de estudo sobreposto pelas ocorrências de escorregamentos translacionais de solo registrados numa encosta densamente habitada e com declividade média igual a 54,97% e máxima medida de 85,64%. No detalhamento da imagem é possível identificar que três dos oito eventos estudados ocorreram no terço intermediário da vertente.

FIGURA 7.3 - ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA



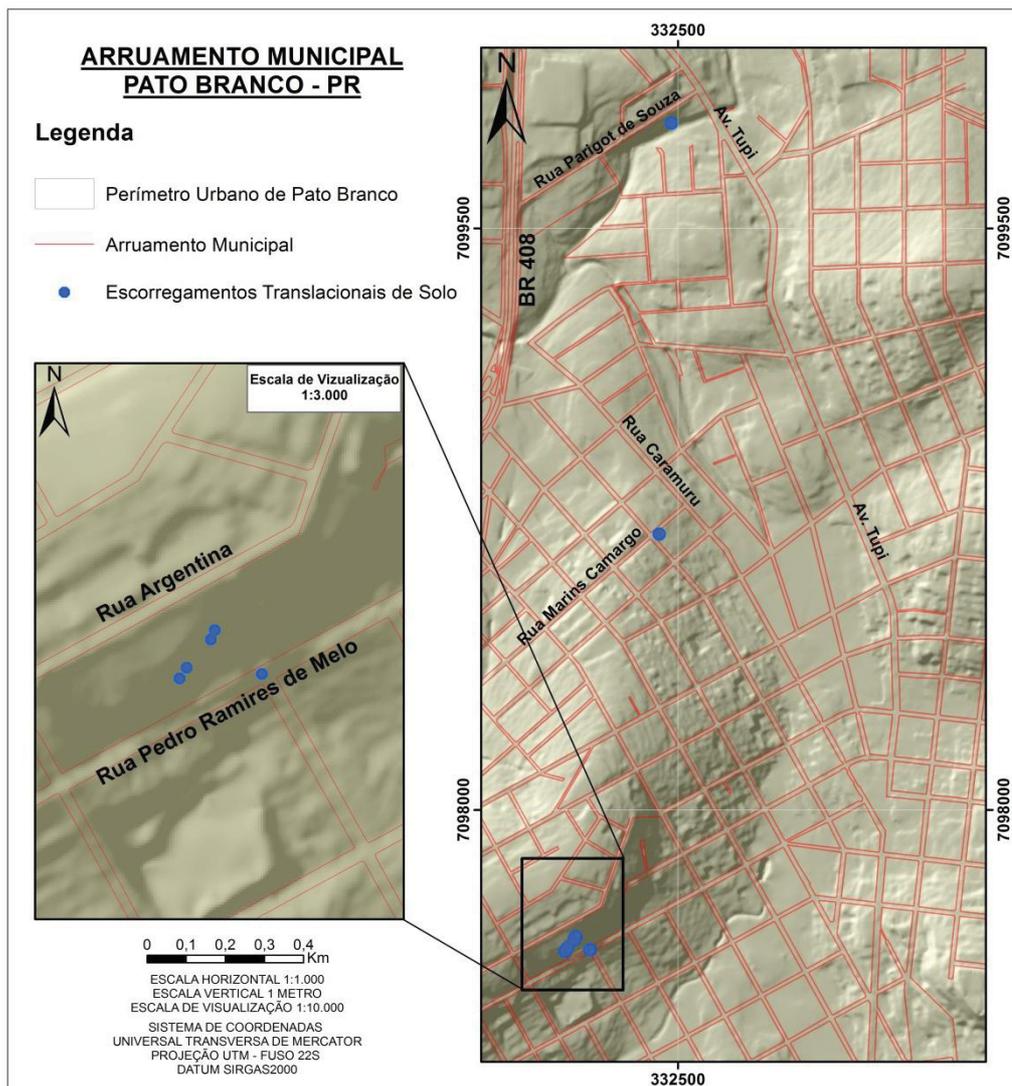
FONTE: A autora (2018)

7.3 INVENTÁRIO DAS CICATRIZES

O inventário das cicatrizes partiu da compilação dos dados de eventos catalogados. Os acidentes foram identificados, numerados de acordo com a ordem cronológica de ocorrência, georreferenciados e sobrepostos ao mapa de declividade da área, afim de, se obter os dados de cota altimétrica e inclinação da vertente.

Uma localidade dentre as demais chama a atenção pelo número de ocorrências. Dos oito registros de ETS, cinco ocorreram na Rua Pedro Ramires de Melo, com distanciamento entre pontos inferior a 50 metros (Figura 7.4). A área em questão contém encostas bastante íngremes com declividades que variam de 22 a 37°.

FIGURA 7.4 – ARRUAMENTO MUNICIPAL DE PATO BRANCO



FONTE: A autora (2018)

Embora o primeiro escorregamento datado seja de 2013 imagens anteriores a esta data já evidenciavam a presença de cicatrizes na área, e obras de contenção como murros de arrumo e gabião, corroborando com a classificação da área como naturalmente instável (Figura 7.5).

FIGURA 7.5 – EVIDÊNCIAS DE INSTABILIDADE NA ENCOSTA DA RUA PEDRO RAMIRES DE MELO



FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018)

LEGENDA: A) Imagem de agosto de 2011, evidenciando cicatriz na vertente.

B) Imagem de 2018 evidencia terreno tratado com obra geotécnica de estabilização.

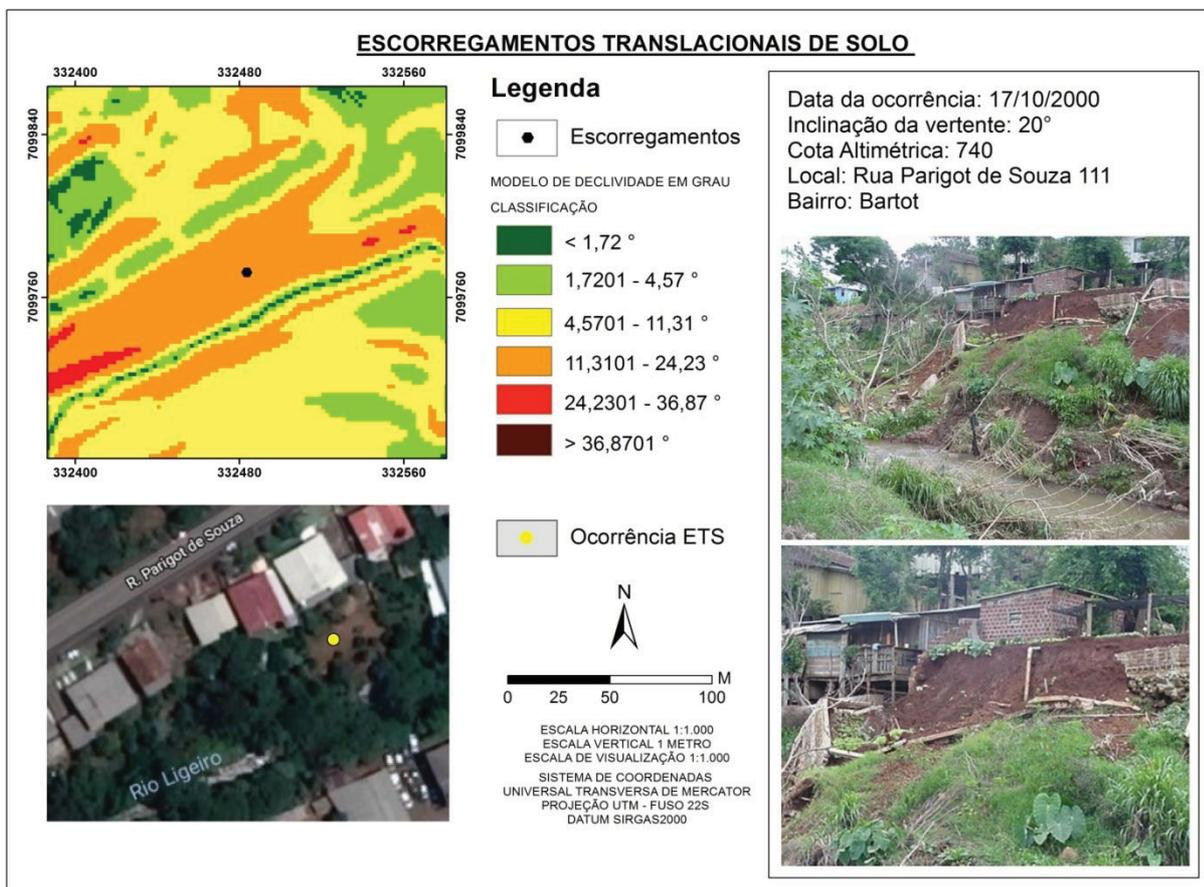
Um fato agravante e provavelmente responsável pelo desencadeamento de sucessivos eventos no local se deu no início do ano de 2013 com a aprovação de uma obra de engenharia, a construção de um prédio de 3 andares, que culminou por desestabilizar a encosta. Durante a execução da obra parte do sopé da vertente foi removido e um arrimo foi tardiamente implantado.

A vertente apresenta características preferencialmente de relevo montanhoso e localmente escarpado com inclinação de até 39°. Trata-se de uma encosta retilínea e alongada de direção NE/SW. As imagens do local evidenciam uma linha paralela a encosta densamente povoada, onde em diversos segmentos o sopé da vertente foram removidos para melhor aproveitamento da profundidade do terreno. Comumente as propriedades apresentam nos fundos dos imóveis taludes muito íngremes de solo exposto como uma pequena cobertura vegetal no topo da

vertente, o que intensifica a instabilidade da encosta devido ao acréscimo do peso da vegetação de médio porte, que atua como esforço solicitante.

O primeiro evento registrado dentro o período considerado por esse pesquisa (1998 a 2018) ocorreu em 17 de outubro de 2000 (UTFPR/PB, 2018). A vertente apresenta características de relevo forte ondulado e a declividade medida no ponto de ruptura é de 20° . A cicatriz está localizada a margem direita do Rio Ligeiro, onde a planície de inundação do rio teve a mata ciliar removida e encontra-se densamente povoada (Figura 7.6).

FIGURA 7.6 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 17/10/2000



FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); Fotografias acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa.

O registro desse evento não é oficial, sendo catalogado por pesquisadores locais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, o acumulado hídrico no momento da ruptura foi de 66 mm. A análise dos dados pluviométricos indicou que o escorregamento ocorreu após sete dias de chuva consecutivos, sendo o acumulado

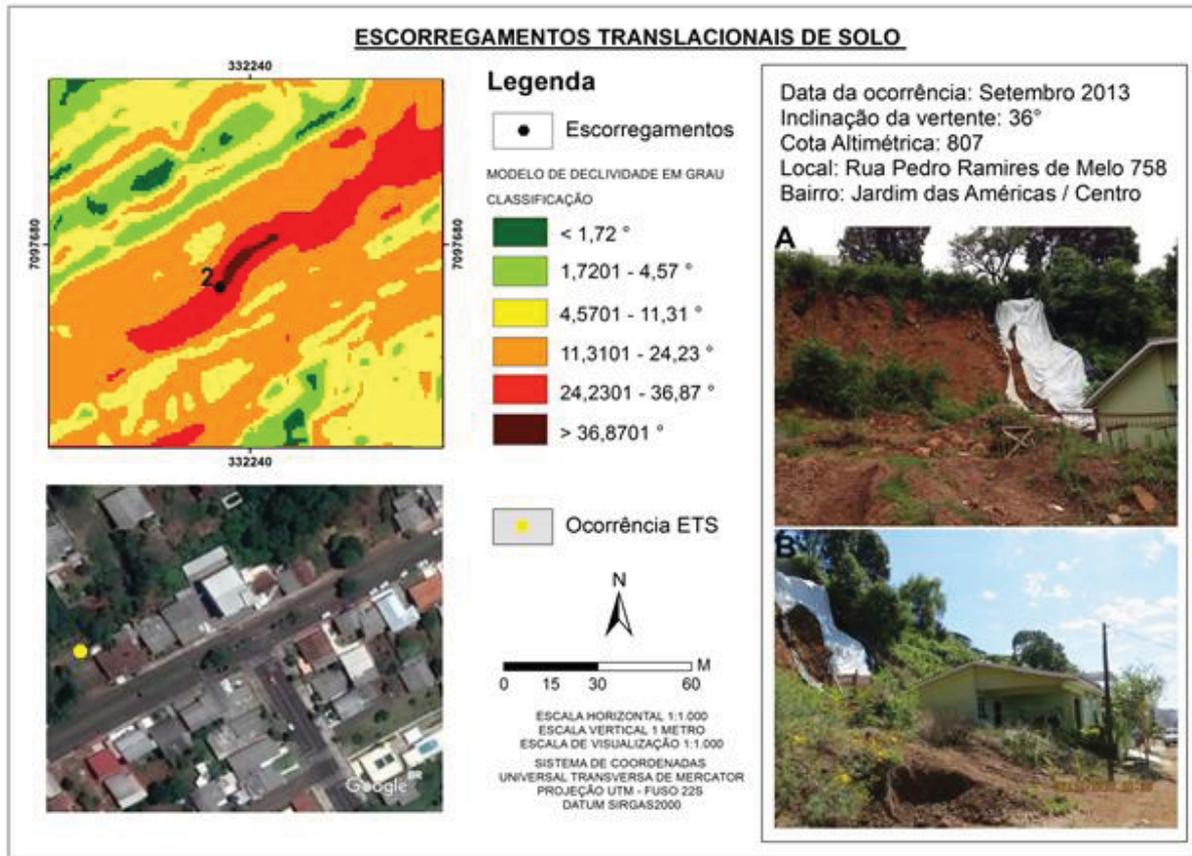
hídrico na data de 43,5 mm, em 96 horas de 120,5 e nos sete dias (168 horas) 184,9 mm.

Do segundo escorregamento considerado não se pode afirmar a data e tão pouco o índice pluviométrico registrado no momento da ruptura, os dados referentes a este evento foram coletados da publicação do Ministério de Minas e Energia em parceria com a CPRM, intitulado “Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa, Pato Branco – Paraná”, que identifica e localiza a cicatriz, e a descreve como evento recente. O relatório apresenta fotografias datadas de 07/10/2013, essa data foi tida como limite para a verificação de dias chuvosos com potencial para desencadear movimentos de massa nos dois meses anteriores. A análise dos dados pluviométricos registrados em setembro/2013 evidenciou dois dias de chuva intensa, os dias 16 e 22 apresentaram picos de chuva e índices acumulados superiores a 60 mm, medida suficiente para provocar a ruptura da vertente em questão se considerados os dados de chuvas dos demais eventos datados.

O evento de setembro de 2013 assim como o de 11/10/2000 não foi oficialmente registrado pela Defesa Civil estadual, sendo citado e identificado pela CPRM (2013). Na publicação as imagens da cicatriz apresentam data de 07/10 e evidenciam um escorregamento recente. Nesse caso não se pode afirmar a data do evento e tão pouco o índice pluviométrico acumulado até o instante da ruptura.

A análise dos dados pluviométricos indicou que o escorregamento tem maiores probabilidades de ter ocorrido nos dias 16 ou 22. Ambas as datas registraram fortes chuvas com teores acumulados elevados e suficientes para o rompimento do talude em questão (Figura 7.7). O dia 16 registrou um evento pluviométrico isolado com acumulado de 65,8mm em 27 horas de chuva de baixa intensidade, sendo o pico do evento com intensidade mediana e acumulado de 64,8 mm em 15 horas. Já o dia 22 registrou um evento com chuvas esparsas nos sete dias anteriores, acumulando em 168 horas 162,8mm, O registro diário do evento é de 61 mm e o pico máximo registrado em 14 horas de 61mm, sendo o acumulado em 72 horas de 92mm.

FIGURA 7.7 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE SETEMBRO DE 2013



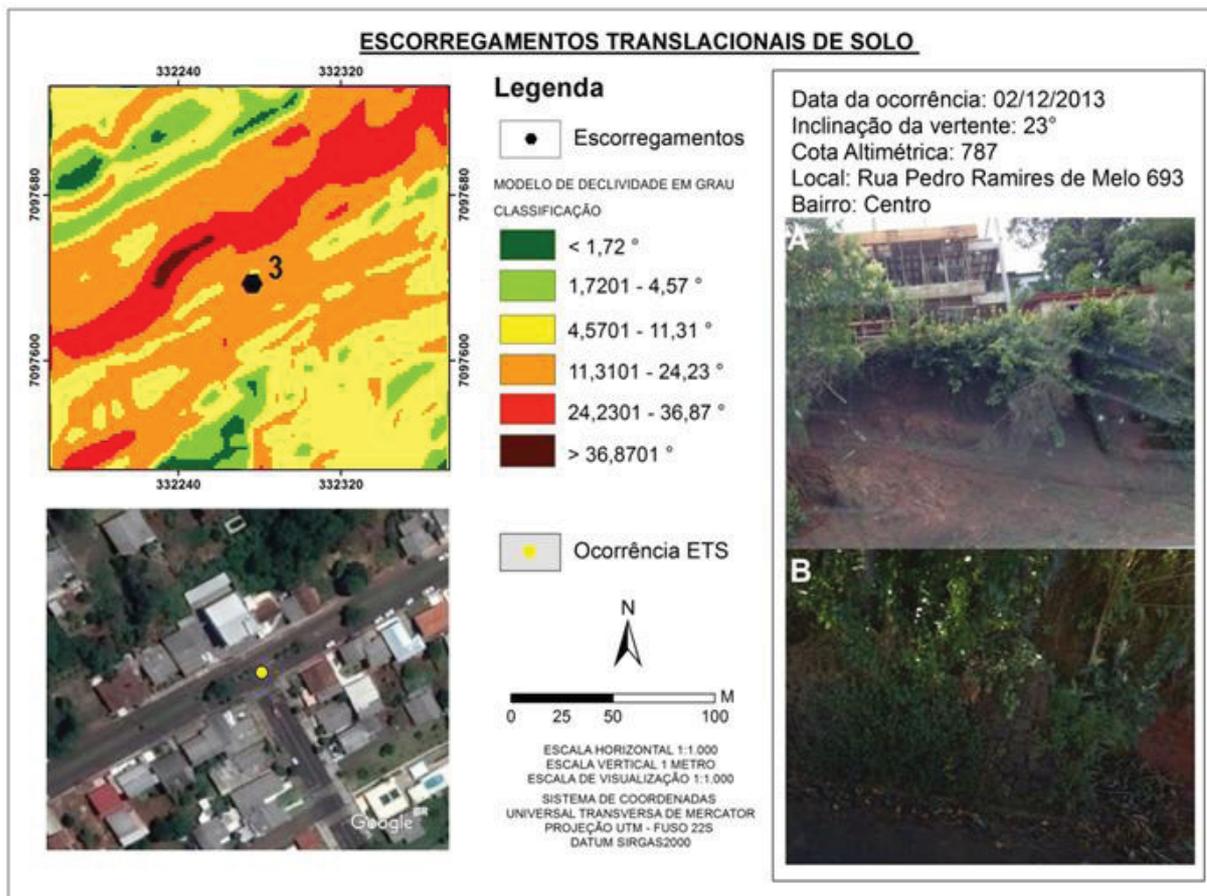
FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); a) Fotografia acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa; b) Modificado de CPRM (2013).

O acidente de 02/12/2013 ocorreu na mesma encosta do evento de setembro. O escorregamento representa o primeiro dos eventos reconhecidos pelas autoridades municipais (Defesa Civil, 2018). O acumulado hídrico à 01h30minh do dia 02, momento da ruptura, foi de 69,5mm, sendo 23° a declividade da encosta.

A análise dos dados pluviométricos indicou 48 horas de acumulado hídrico, sendo o registrado na data do acidente de 53,6mm e no dia anterior 21,2 mm. O pico do evento ocorreu em 4 horas com chuvas de intensidade elevada e registro pluviométrico acumulado de 70,2mm.

A figura 7.8 identifica o escorregamento de 02/12/2013 com detalhamento da vista frontal da cicatriz tendo ao fundo o prédio em construção, e a vista do talude datada de 2011 com o muro de gabião que teve parte mobilizada no evento.

FIGURA 7.8 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 02/12/2013

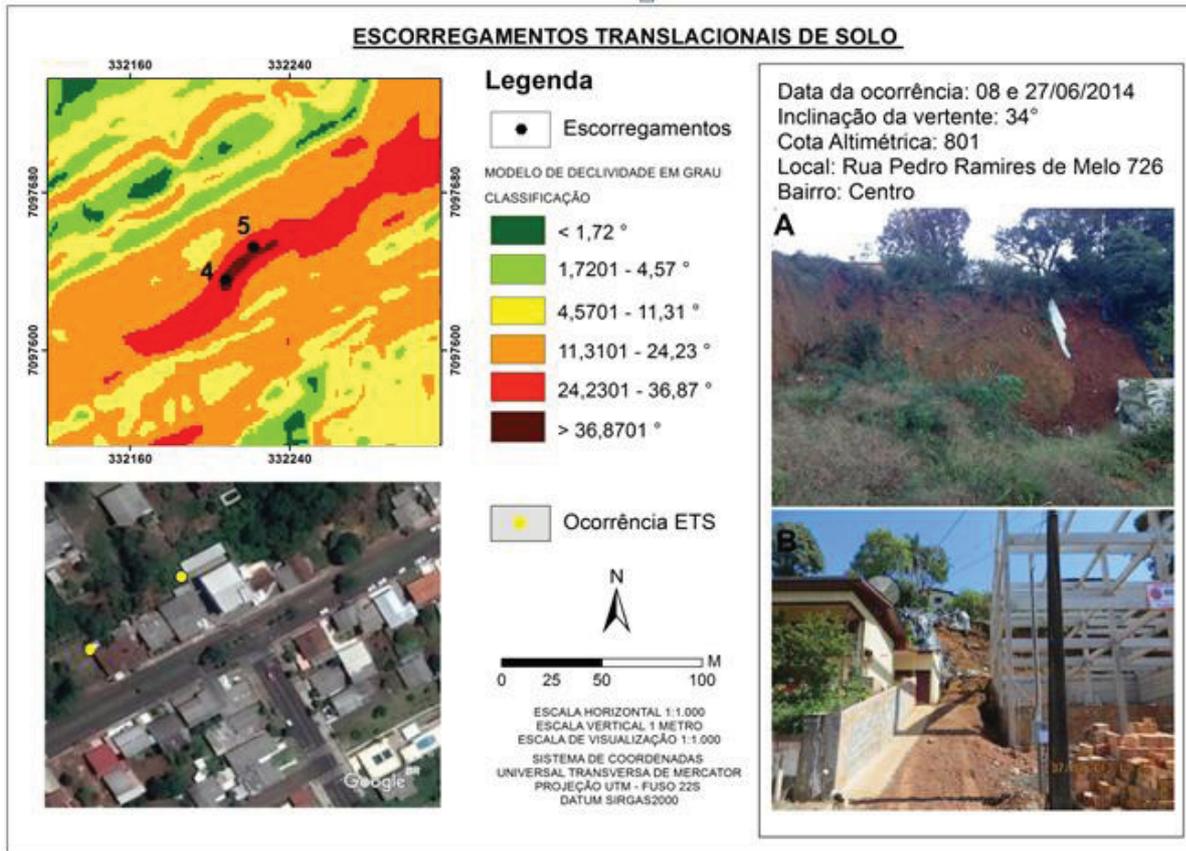


FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); Fotografias acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa;

Os escorregamentos registrados em 08 e 27 de junho de 2014 ambos na Rua Pedro Ramires de Melo, onde a vertente de 39° rompeu no dia 08 e voltou a deslizar no dia 27 do mesmo mês, num ponto com declividade igual a 34° (UTFPR/PB, 2018). Ambos os eventos não são reconhecidos pelas autoridades municipais (Figura 7.9).

As imagens inseridas na figura 7.9 evidenciam a vista frontal da cicatriz. No canto direito da imagem “A” é possível identificar o extremo do muro de arrimo construído atrás de uma edificação de 3 andares. Na imagem “B” segundo (CPRM, 2013) foi registrada em outubro de 2013 e retrata uma cicatriz recente, a encosta voltou a deslizar 9 meses depois.

FIGURA 7.9 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO DE 08 E 27/06/2014

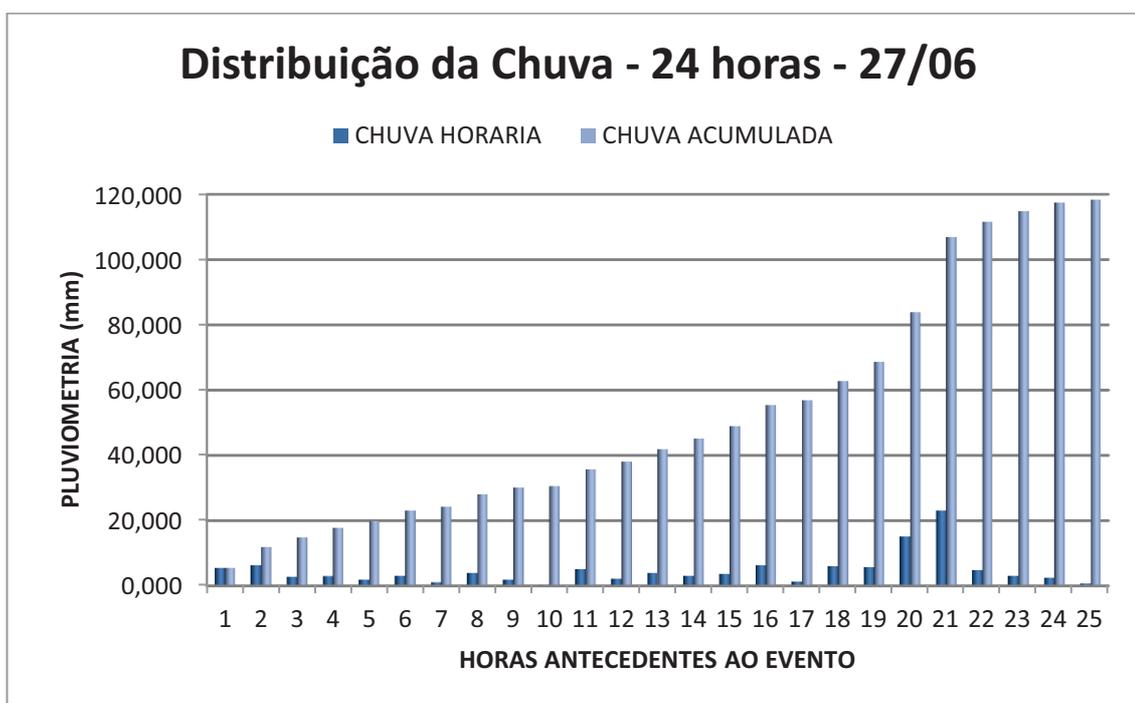
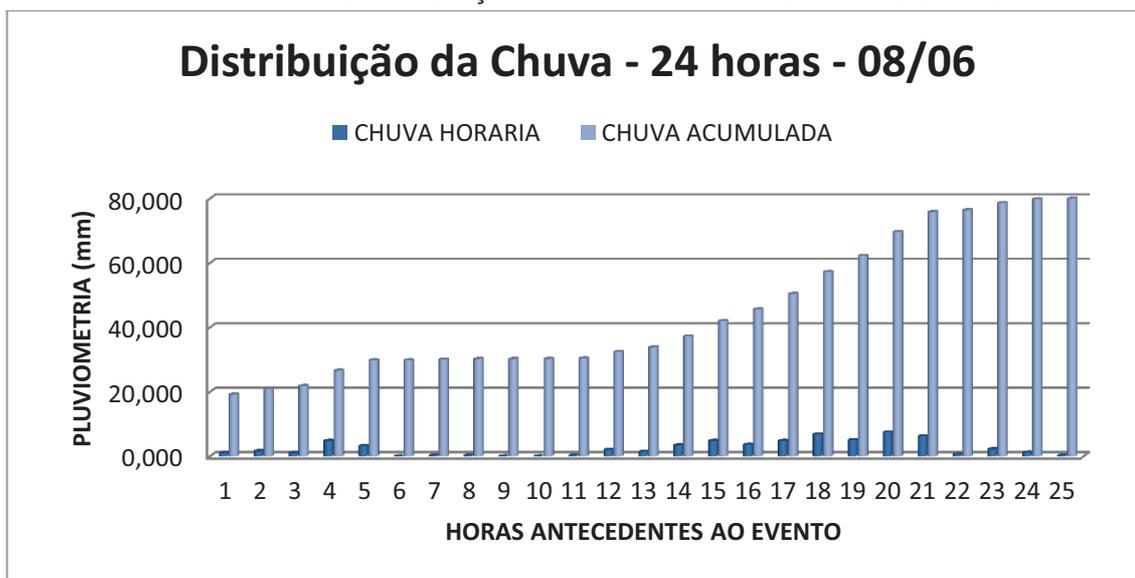


FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); a) Fotografia acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa; b) Modificado de CPRM (2013).

O acumulado hídrico medido nas duas datas é semelhante, sendo o valor averiguado no momento da ruptura no dia 08 de 57,2mm e no dia 27 de 57,6mm. A análise da distribuição das chuvas nas 24 horas antecedentes de cada evento indicou que cerca de 4 horas antes da ruptura ocorreram pequenos picos de precipitação e que os deslizamentos aconteceram em intervalos de baixa intensidade (Figura 7.10). Em ambos eventos a chuva se manteve constante.

As 96 horas que antecederam o evento do dia 08/06 acumularam 111,4mm de chuva. Na data do acidente foram registrados 50,2mm, sendo o acumulado em 48h de 82,8mm de chuva.

FIGURA 7.10 – DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS NOS DIAS 08 E 27/06/2014



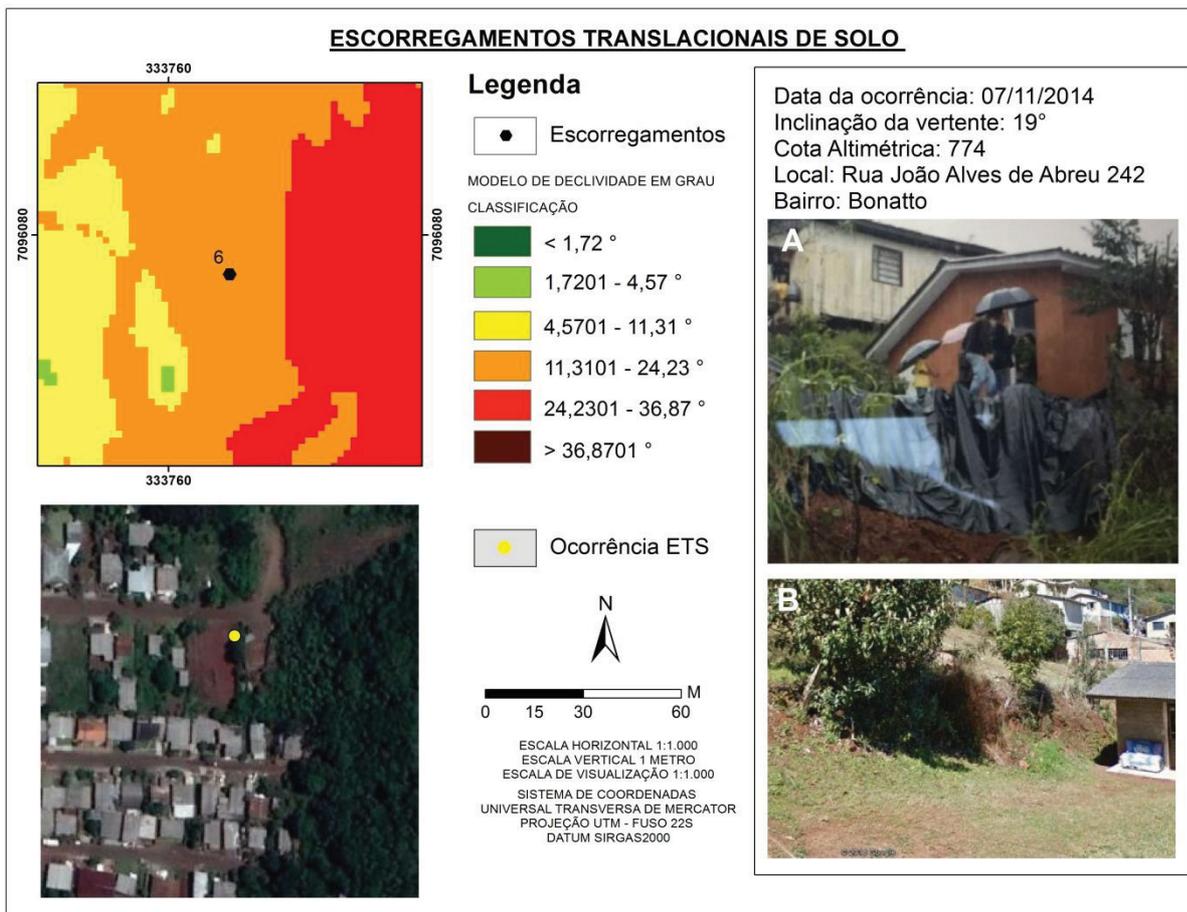
FONTE: Modificado de SIMEPAR (2018)

No dia 27 de junho foi registrado um evento intenso precedido por três dias de chuva. O acumulado hídrico medido na data foi de 102,2mm, sendo o cumulado em 48h de 121,1mm e em 72h de 147,83mm. A análise dos picos de chuva indicou um evento constante de intensidade mediana à elevada em ao menos três picos de teor acumulado crítico. Os picos medidos foram: 147,83mm em 72h, 130,6mm em 28h e 102,23mm em 24h. O evento de chuva em questão se estendeu por mais 2 dias cessando a precipitação na tarde do dia 29/06/2014.

O evento registrado em 07/11/2014 ocorreu em vertente de características de relevo forte ondulado e a ruptura se deu a inclinação de 19° (DEFESA CIVIL, 2018). A cicatriz de dimensão métrica localiza-se ao lado de uma moradia (Figura 7.11). A imagem aérea do local evidencia a presença de rastejo nas porções superiores da vertente, assim como a fotografia da cicatriz, onde é possível distinguir troncos inclinados na vegetação.

O acumulado hídrico no momento da ruptura foi de 52mm. A análise dos dados de chuva indicou 2 eventos distintos em um único dia sendo o acumulado em 24h de 94,4mm, e o pico do evento registrado em 7h com a pluviometria de 50,6mm.

FIGURA 7.11 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 07/11/2014

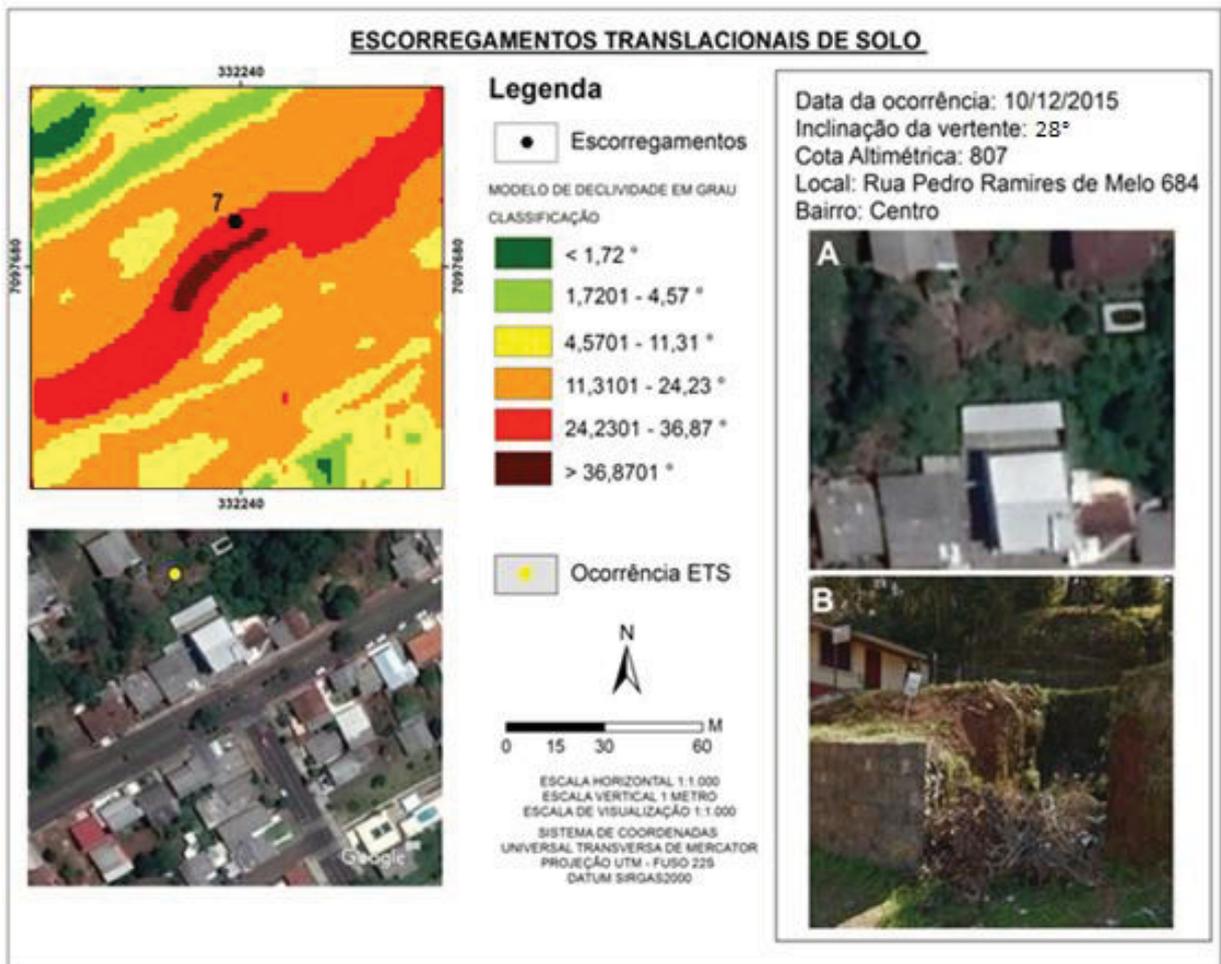


FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); a) Fotografia acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa.

O escorregamento de 10/12/2015 é o 5º evento ocorrido da Rua Pedro Ramires de Melo. O escorregamento foi registrado pela Defesa Civil do Paraná e estranhamente não há registro do acumulado hídrico no momento da ruptura. A declividade medida no ponto de ruptura é de 28° (Figura 7.12).

A análise dos dados pluviométricos indicou 48 horas de acumulado hídrico, sendo o registrado na data do acidente de 42,8mm, e 48h de 77,4mm. O pico do evento ocorreu em 6 horas com chuvas de intensidade moderada a baixa e registro pluviométrico acumulado de 63,6mm. O mês de dezembro de 2015 registrou outros três picos de chuva sem registros de movimentos de massa, sendo o primeiro de 12 a 15/12 com 82,2mm; o segundo de 18 a 19/12 com 72,4mm e o último de 27 a 31/12 com 157,2mm.

FIGURA 7.12 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 10/12/2015

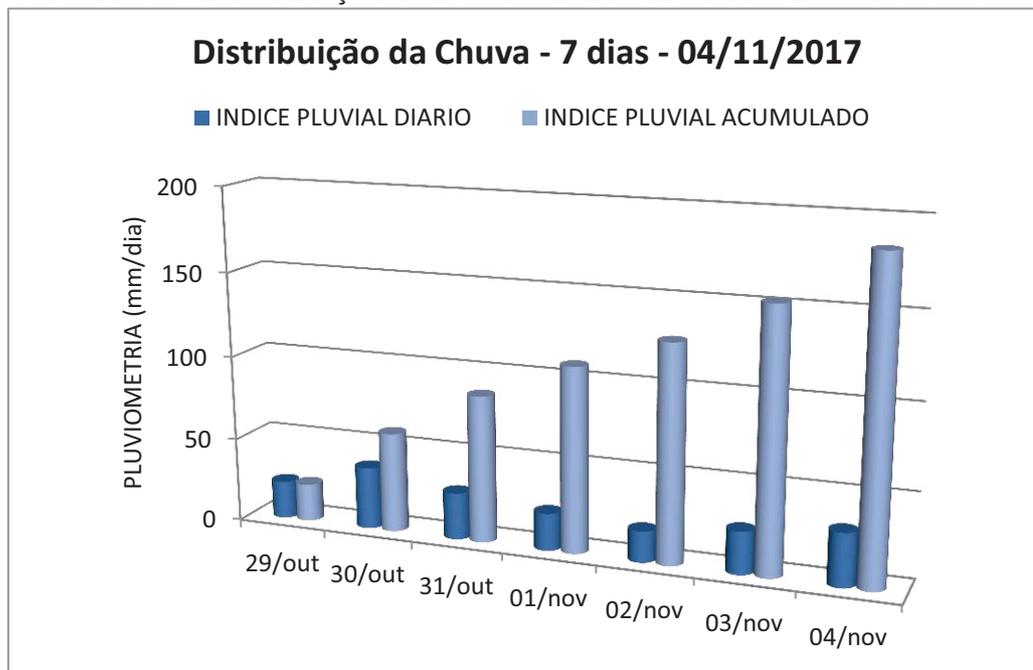


FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018)

A figura 7.12 apresenta a visão frontal do talude em 2011 com destaque para os dois muros de arrimo em planos distintos, sendo o segundo posicionado atrás do imóvel a esquerda da imagem (GOOGLE DIGITALIGLOBE, 2018).

O escorregamento de novembro de 2017 não consta nos registros oficiais do município. As imagens comprobatórias do movimento de massa foram extraídas da publicação do Jornal Diário do Sudoeste datada de 06/11/2017. A análise dos dados de precipitação indicou que o escorregamento ocorreu após sete dias de chuva consecutivos, sendo o acumulado hídrico acumulado na data de 31,4mm, em 96 horas de 127,4 e nos sete dias (168 horas) 184mm (Figura 7.13).

FIGURA 7.13 - DISTRIBUIÇÃO DAS CHUVAS ENTRE OS DIAS 29/10/2017 A 04/11/2017

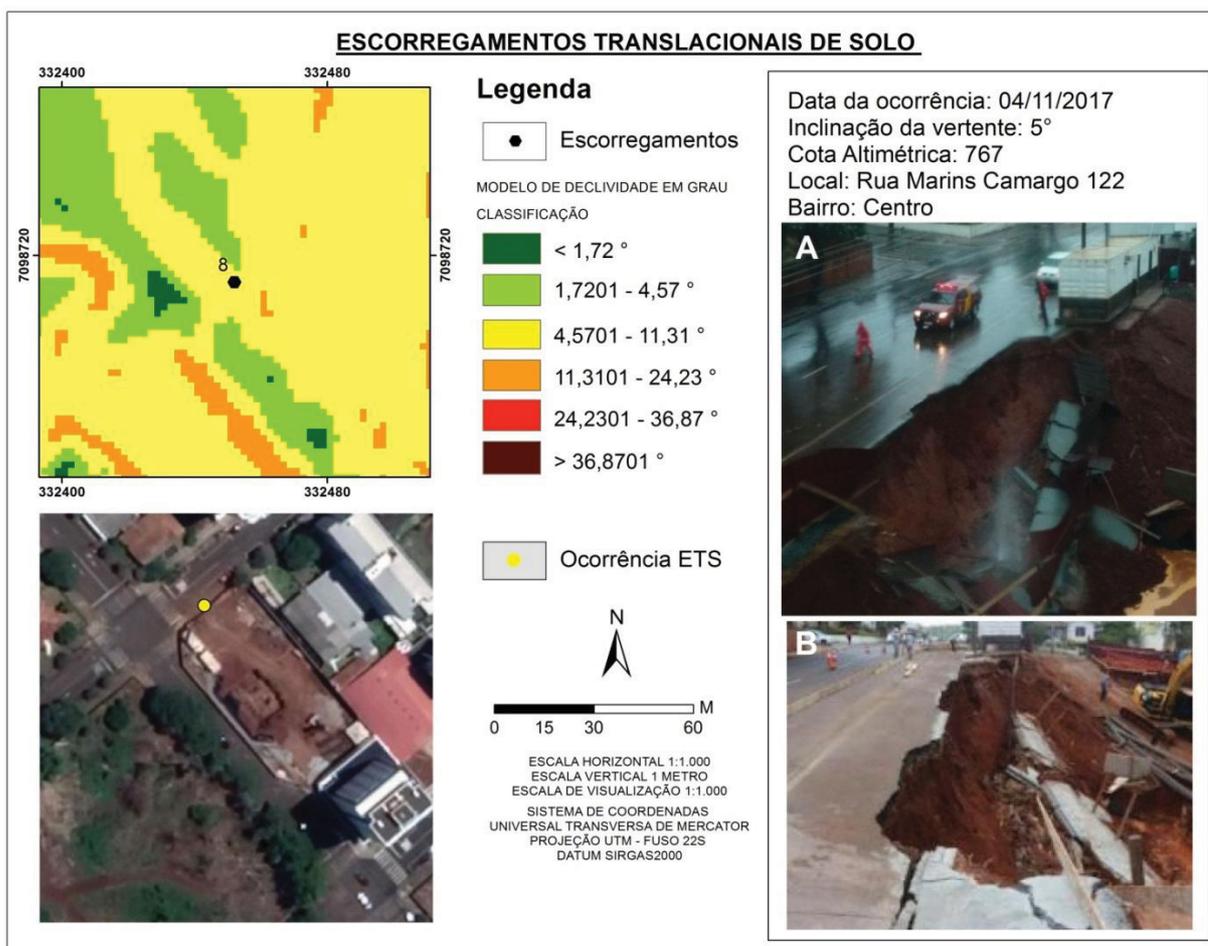


FONTES: Modificado de SIMEPAR (2018)

A ruptura de 04/11/2017 denota forte interferência antrópica evidenciada na alteração da topografia da área, haja vista que em 2016 o terreno em que se deu o acidente apresentava inclinação de 5° e em 2017 foi profundamente escavado para a execução de uma obra arquitetônica (Figura 7.14). As imagens da cicatriz evidenciam um canteiro de obras com um corte retilíneo de inclinação estimada compatível a classificação da EMBRAPA de relevo montanhoso, não sendo possível definir a declividade no ponto de ruptura.

A modificação antrópica do terreno associada a um histórico pluviométrico elevado e um acumulado hídrico constante de sete dias de chuva culminaram no escorregamento de 04/11/2017.

FIGURA 7.14 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 04/11/2017



FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018). Modificado de Jornal Diário do Sudoeste (2018)

8. RESULTADOS

ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLOS EM ÁREA URBANA, CORRELACIONADOS A EVENTOS DE CHUVA CRÍTICA. ESTUDO DE CASO PATO BRANCO – PARANÁ.

RESUMO

Escorregamentos translacionais de solo são movimentos de massa de natureza geológica-geotécnica, cuja deflagração dos processos comumente refletem perdas estruturais e humanas. O perímetro urbano de Pato Branco, município localizado no sudoeste Paranaense, possui um histórico de eventos de instabilidade de encostas assim como condições climáticas e topográficas favoráveis à ocorrência de escorregamentos. O objetivo da pesquisa é investigar a suscetibilidade a ocorrência dos processos e correlacioná-la com eventos de pluviosidade intensa, mediante uma abordagem que integre informações geológicas, geográficas, geotécnicas e pluviométricas do município. Para tanto, aplicou-se um modelo determinístico para o cálculo do fator de segurança. As análises foram operacionalizadas em um Sistema de Informações Geográficas – SIG, com uso de modelos digitais de terreno (MDT) para geração da declividade requerida para a obtenção dos índices de estabilidade ou fator de segurança (FS). As análises consideraram a influência da vegetação no sistema e contemplaram oito cenários distintos de saturação hídrica do solo: 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 100%. A representação do FS da área se deu por meio de cinco classes de suscetibilidade a escorregamento translacional de solo: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. Os índices pluviométricos críticos capazes de deflagrar escorregamentos foram estabelecidos a partir da correlação dos modelos determinísticos e empíricos, com auxílio de séries históricas de chuvas dos últimos 45 anos. A análise do FS demonstrou que as áreas mais instáveis são as encostas com declividade superior a 20°, e que a presença de vegetação, quando não considerada a força de atirantamento das raízes, reduziu a estabilidade da encosta. A validação dos mapas foi realizada por meio da comparação com cicatrizes de eventos pretéritos, com 87% de compatibilidade entre a classe de muito alta suscetibilidade em cenários de saturação hídrica superiores a 30%. A correlação dos dados de chuva e FS indicou a associação direta entre eventos de chuvas intensas e escorregamentos translacionais de solo.

Palavras-chave: Escorregamentos translacionais de solo. Fator de Segurança. Chuva Crítica.

ABSTRACT

Translational soil slides are mass movements of geological-geotechnical nature, whose deflagration of processes commonly reflects structural and human losses. The urban perimeter of Pato Branco, a city located in the southwest of the state of Parana, presents an event history of slope-instability as well as climatic and topographic conditions favorable to the occurrence of landslides. The objective of this research is to investigate the susceptibility to the occurrence of processes and correlate them with events of intense rainfall by constructing an approach that integrates local geological, geotechnical and pluviometric informations. For this purpose, a deterministic model for the calculation of the safety factor was applied. The analysis were operationalized in a Geographic Information System (GIS), using digital terrain models (TDM) to generate the declivity required to obtain the stability indices or safety factors (SF). The results considered the influence of the vegetation in the system and contemplated eight different scenarios of soil water saturation: 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% and 100%. The SF representation of the area was conducted through five classes of susceptibility to soil translational sliding: very low, low, moderate, high and very high. The critical rainfall indices, capable of triggering landslides, were established based on the correlation of deterministic and empirical models, obtained with the aid of daily local rainfall data of the last 45 years. The analysis of the SF has demonstrated that the most unstable areas are slopes greater than 20°, and that the presence of vegetation, when the strength of pulling roots is not considered, reduced the stability of the slope. The validation of the maps was performed by comparison with the scars of past events, with 87% of compatibility between the class of very high susceptibility in scenarios of water saturation greater than 30%. The rainfall to SF data correlation pointed out the direct link between intense rainfall events and translational soil slides.

Keywords: Translational Soil Slides. Safety Factor. Critical Rainfall.

8.1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa, em especial os escorregamentos, vêm recebendo grande atenção da comunidade científica nas últimas décadas, em face de magnitude dos problemas causados por esses eventos. Escorregamentos translacionais de solo (ETS) são movimentos de massa que envolvem transporte gravitacional de solo, rocha e matéria orgânica devido a dinâmica geomorfológica das encostas. Quando ocorrem em grandes centros urbanos esses eventos assumem frequentemente proporções catastróficas, uma vez que as interferências antrópicas geram novas relações com os condicionantes naturais deflagradores dos mesmos (FERNANDES *et al.*, 2001).

Vertentes naturais tem sua estabilidade condicionada a geologia, geomorfologia e fisiografia da área. As características geológicas mais significativas são a estrutura e mineralogia das rochas, essenciais para a pedogênese. Quanto à morfologia do terreno, destacam-se a declividade e tipo de relevo predominante no local. A fisiografia regional é de suma importância no perfil de estabilidade de uma encosta, nesta categoria inclui-se o clima, o regime de chuvas e o tipo de cobertura vegetal.

Autores como Montgomery *et al.*, (1997), Fernandes *et al.*, (1994), e Fiori e Carmignani (2009), propuseram modelos matemáticos para a previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos dependentes da compreensão dos diferentes mecanismos e fatores envolvidos no processos. A utilização de tais modelos requer ensaios geotécnicos em campo e laboratório, e o monitoramento dos processos, principalmente no que se refere à caracterização da dinâmica hidrológica superficial e subsuperficial da encosta.

Nessa perspectiva, uma encosta é composta por uma massa de solo sujeita a ação direta de três campos de forças: o peso do material disposto sobre a vertente, o fluxo hídrico da encosta em seu mais amplo aspecto, ou seja, escoamento superficial e subsuperficial, e a resistência ao atrito. A estabilidade da encosta é expressa por um índice quantitativo que indica o comportamento da vertente diante de processos morfodinâmicos considerando a condição de equilíbrio limite entre as forças resistentes ao cisalhamento e solicitantes.

A teoria de equilíbrio limite admite que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços resistentes. A fim de comparar a estabilidade das vertentes em condições diferentes de equilíbrio é definido o Fator de Segurança (FS), índice obtido da razão entre as forças resistentes ao deslizamento e a resultante das forças solicitantes. A condição especial de equilíbrio-limite corresponde a um FS de valor igual a 1,00, ponto crítico para ruptura. O FS é diretamente proporcional à estabilidade da vertente, ou seja, quanto maior for o valor acima da unidade, mais estável é a encosta e, por consequência, menos suscetível a ocorrência de ETS.

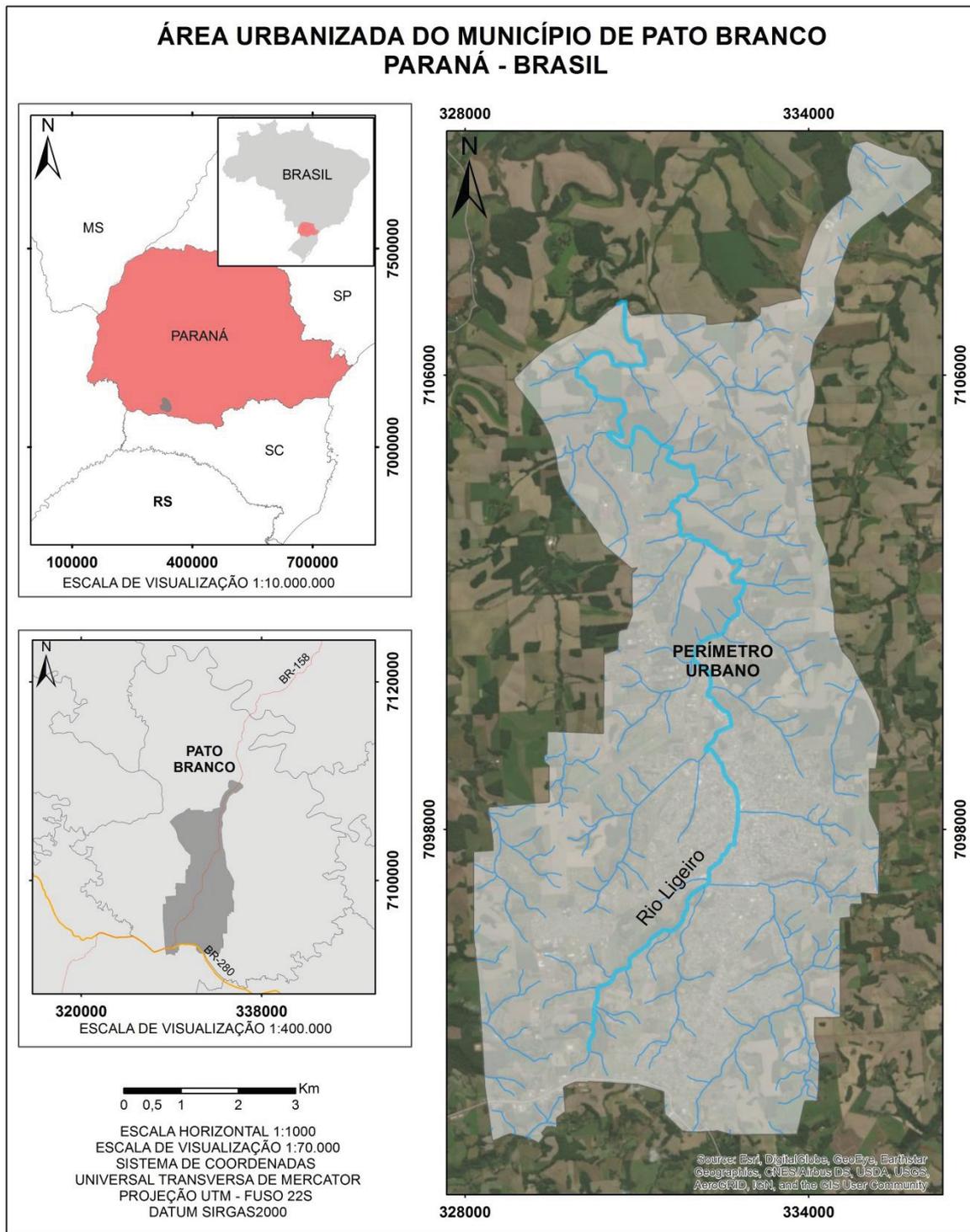
Técnicas de SIG para espacialização de equações de FS foram empregadas por diversos autores, dentre eles: Fiori (1995a e b), Girardi (1999), Nunes (2002), Fiori e Nunes (2003), Amaral (2003), Borchardt (2005), Kosziak (2005), Tabalipa (2008), D'Aroz (2015) e Acevedo (2017).

Existem ainda rotinas computacionais customizadas que facilitam a aplicação do FS em SIG, automatizando as fases de processamento. Dentre as rotinas computacionais destacam-se dois exemplos amplamente difundidos, o SHALSTAB e o SINMAP, ambos comumente empregados no Brasil. Na aplicação do SHALSTAB (Montgomery e Dietrich, 1994; Dietrich e Montgomery, 1998) destacam-se dentre outros, os trabalhos de Fernandes *et al.*, (2001), Fernandes *et al.*, (2004), Guimarães *et al.*, (2003), e Ramos *et al.*, (2007). Já o modelo SINMAP (Pack *et al.*, 1998a, Pack *et al.*, 1998b e Pack *et al.*, 2001) foi empregado por Santos *et al.*, (2006) e Arruda Jr *et al.*, (2015). Tais modelos se assemelham quanto à potencialidade da predição de estabilidade de encostas.

Nesse contexto, a pesquisa visa empregar o modelo do FS na análise da suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos translacionais de solo em vertentes e determinar a influência de eventos pluviométricos intensos na deflagração destes processos no município de Pato Branco/PR, além de estabelecer índices pluviométricos críticos para a região de estudo.

A área de estudo é o perímetro urbano do município de Pato Branco situado na região sudoeste do Paraná (Figura 8.1).

FIGURA 8.1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2018)

8.1.1 Caracterização da Área de Estudo

Pato Branco apresenta condicionantes topográficos favoráveis a ocorrência de ETS, possui uma vasta gama de dados geotécnicos de solos, base planialtimétrica em escala de detalhe 1:1000, registros históricos de dados hidrológicos dos últimos 45 anos coletados em estações meteorológicas inseridas na área de estudo, e registros recentes de escorregamentos de solo em perímetro urbano.

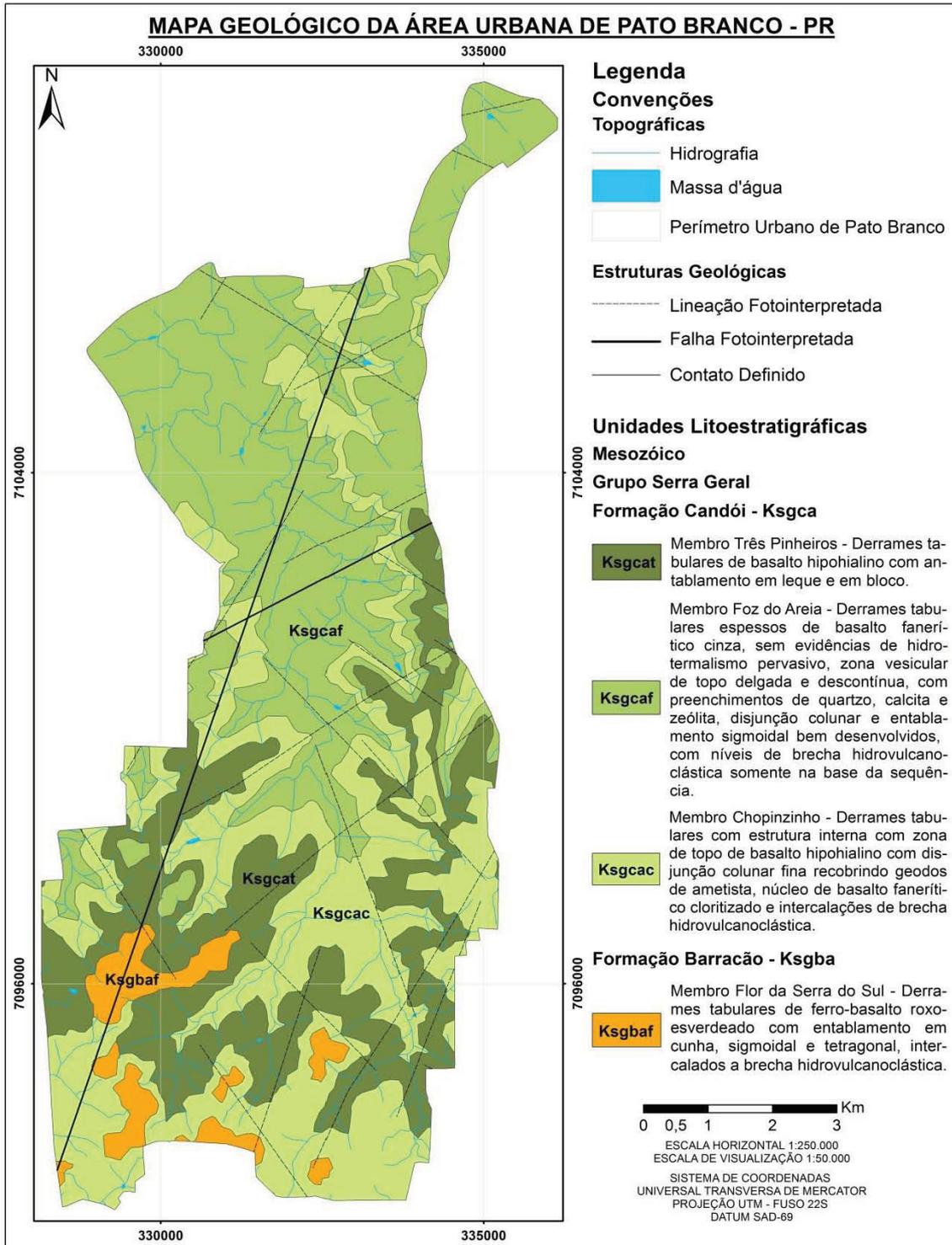
Na porção urbana de Pato Branco, de acordo com Arioli *et al.* (2013) evidenciam-se duas Formações geológicas, ambas compostas preferencialmente por basaltos toleíticos. A Formação Barracão é formada por basaltos de derrames lobados estratigraficamente espessos e regionalmente extensos, associados a abundantes intercalações de brechas vulcanoclásticas e sedimentos terrígenos. Já a Formação Candói, formada por derrames tabulares de basalto maciço de cor cinza a cinza-esverdeado, distingue-se da Formação Barracão pela menor abundância de lobos vesiculares, brechas hidrovulcanoclásticas e intercalações sedimentares, exceto na base do membro Foz da Areia. A Formação Candói constitui 95,98% da área de estudo, onde afloram os membros Três Pinheiros, Foz do Areia e Chopinzinho; enquanto a Formação Barracão ocorre em 4,02% da área e é representada pelo membro Flor da Serra do Sul (Figura 8.2).

A hidrologia local está condicionada aos afluentes do rio Chopim que por sua vez é afluente do rio Iguaçu, o maior complexo hidrográfico do estado. A bacia hidrográfica de maior destaque na área é a do rio Ligeiro, uma sub-bacia do rio Chopim.

De acordo com a classificação climática de Koppen, o clima de Pato Branco é definido como Cfb (C – mesotérmico; f – temperado úmido; b – verão brando com temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C°). Trata-se de um clima tipicamente subtropical úmido, com chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano, sem estação seca definida, mas com as quatro estações sensivelmente perceptíveis. O clima da cidade é ainda influenciado pela altitude moderada da região e também pela continentalidade devido a distancia do litoral. A média de precipitação anual é de 2109,79 mm/ano, sendo outubro o mês mais chuvoso, e agosto o mês com menor índice pluviométrico (TABALIPA, 2008). Sazonalmente há registros de

episódios de chuvas concentradas que extrapolam as médias previstas para os meses de ocorrência.

FIGURA 8.2 - MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA URBANIZADA DE PATO BRANCO



FONTE: Adaptado de ARIOLI *et al.* (2013)

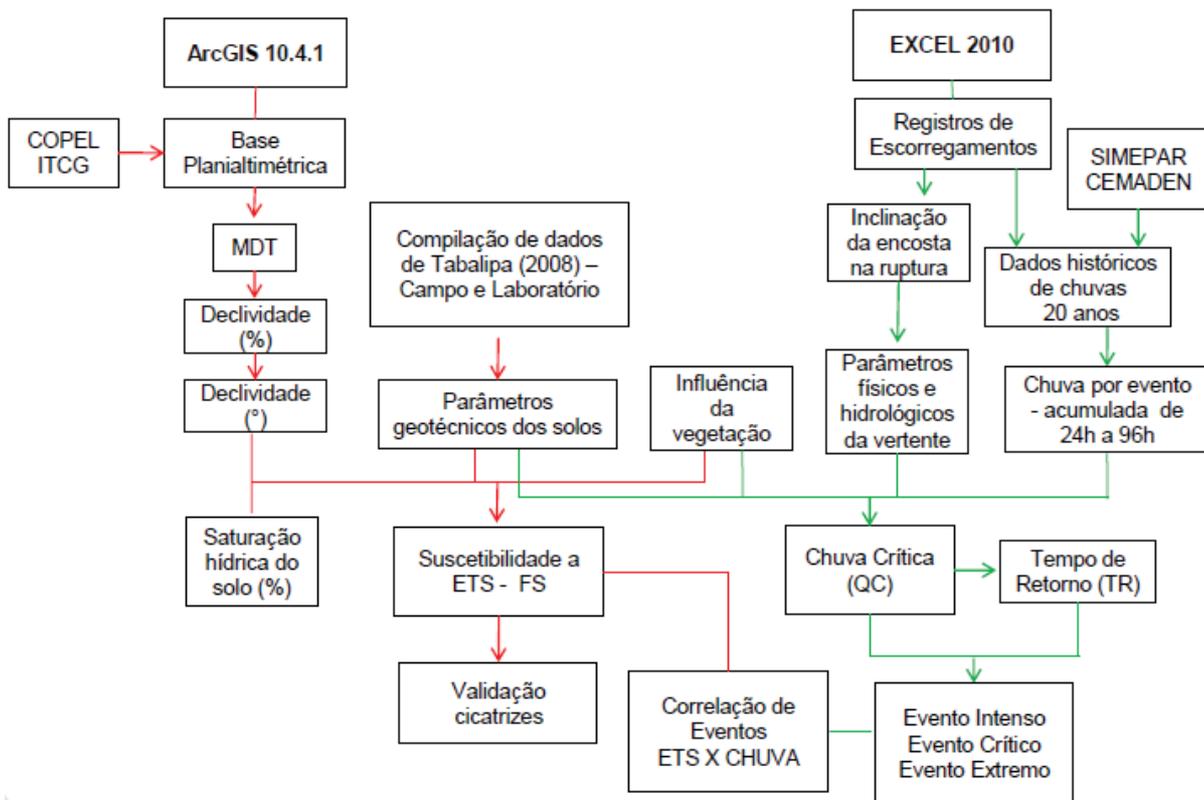
Quanto às características geomorfológicas, o município apresenta relevo suave ondulado com vales em “V” abertos na porção leste e superfícies levemente aplainadas na porção oeste. As formas predominantes são topos alongados e vertentes convexas, moldadas nos derrames da Formação Serra Geral (OKA-FIORI *et al.*, 2006).

As encostas possuem declividade de 0 a 10% em mais de 65% da totalidade, relevo do tipo ondulado com declividade de 10 a 20% ocorre em toda a área de estudo representando aproximadamente 30% da totalidade, e aproximadamente 5% da área contempla um relevo fortemente ondulado com comportamento relativamente acidentado e declividades superiores a 30%. Localmente ocorre relevo do tipo escarpado, nesses pontos são evidenciadas as cabeceiras dos cursos formadores do rio Ligeiro, canais de primeira ordem com densidade hidrográfica alta e padrão de drenagem dendrítica a subparalela, sendo a maioria deles encaixados em vales em forma de “V” (TABALIPA, 2008).

8.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo dessa pesquisa foram mantidas duas frentes paralelas de tratamento de dados, cujas etapas de ambas estão representadas no fluxograma da pesquisa (Figura 8.3). Juntas convergem para alcançar os objetivos propostos.

FIGURA 8.3 - FLUXOGRAMA ORGANIZACIONAL DO PROJETO



FONTE: A autora (2018)

8.2.1 Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais de Solo

A definição das áreas suscetíveis à ocorrência de ETS parte da confecção do modelo digital de terreno da área objeto da pesquisa. O MDT foi processado no software ArcGIS 10.4.1 (ESRI, 2015), com algoritmo ANUDEM (*Topo To Raster*), a partir de dados planialtimétricos da área na escala 1:1000 com curvas de nível de

equidistância métrica, gerada pela Secretaria de Desenvolvimento Urbano – PARANACIDADE (2016), e altimetria aferida a cada 5 metros pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL (2014). Ambas foram cedidas pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná - ITCG.

A figura 8.4 retrata o atributo topográfico de declividade em grau gerado como produto MDT e classificado segundo a adaptação da proposta da EMBRAPA (2006) que caracteriza o tipo de relevo pela inclinação percentual das vertentes (Tabela 19). Para viabilizar o cálculo do FS os intervalos foram reclassificados de percentual para grau.

TABELA 19 - CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO SEGUNDO A DECLIVIDADE

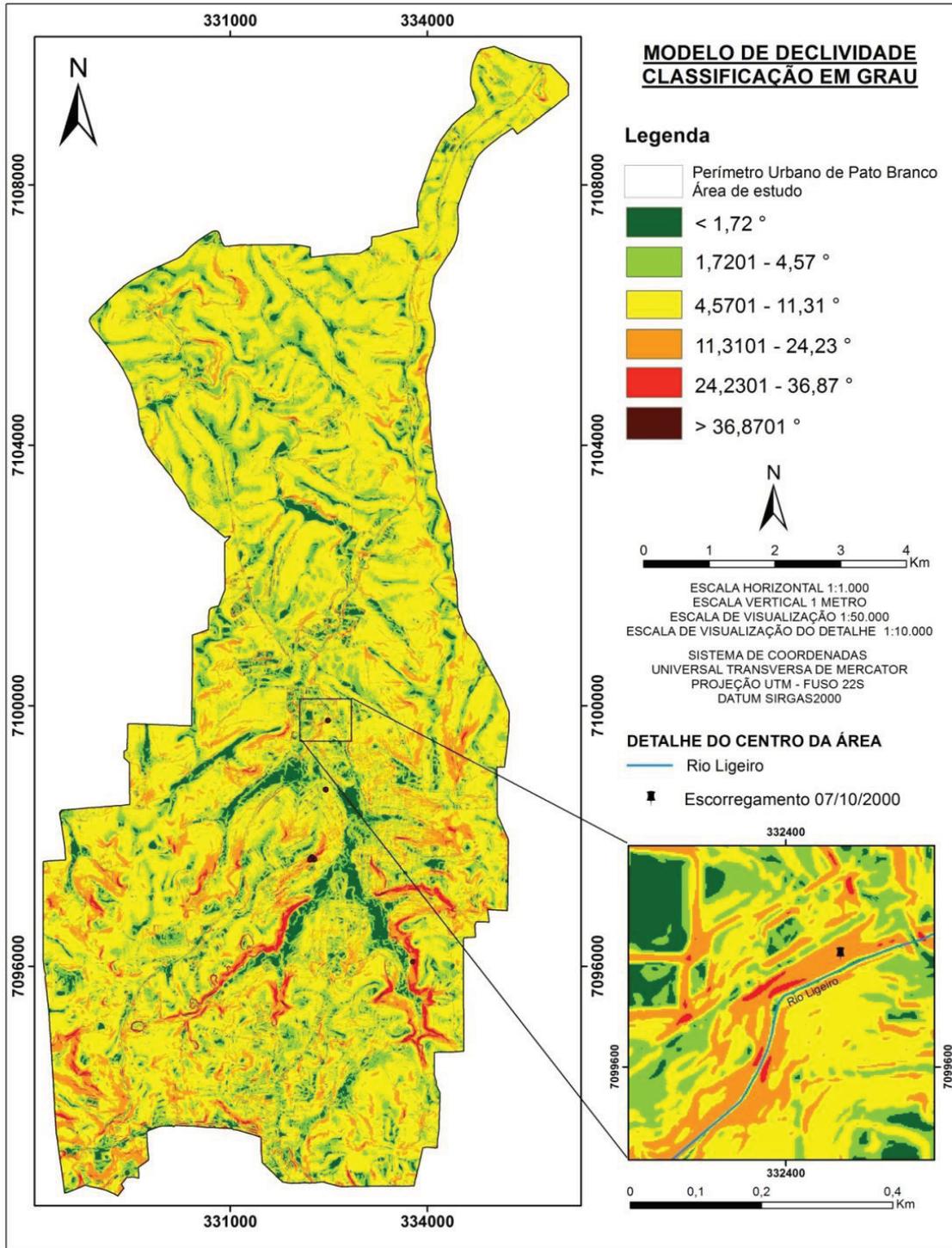
Declividade (%)	Declividade (°)	Classificação o Relevo
0 - 3	0 - 1,72	Plano
3 - 8	1,72 – 4,57	Suave Ondulado
8 - 20	4,57 – 11,31	Ondulado
20 - 45	11,31 – 24,23	Forte Ondulado
45 - 75	24,23 – 36,87	Montanhoso
> 75	> 36,87	Escarpado

FONTE: Adaptado de EMBRAPA (2006)

A metodologia utilizada para a determinação da suscetibilidade a escorregamentos em encostas urbanas segue a proposta apresentada por Fiori e Carmignani (2009), baseada na teoria de equilíbrio-limite e empregada por meio de método determinístico.

O FS resultante representa a razão das forças resistentes ao movimento da massa de solo, pelas forças solicitantes. Foram consideradas de maneira geral a topografia da área, as características geotécnicas dos solos e a saturação hídrica das vertentes. No que diz respeito à cobertura vegetal, a área foi analisada em dois cenários, no primeiro a cobertura vegetal é inexistente (equação 13) nesse caso todos os parâmetros de entrada referem-se ao solo e encosta.

FIGURA 8.4 – MODELO DE DECLIVIDADE EM GRAU



FONTE: A autora (2018)

Já no segundo a área é plenamente recoberta por vegetação remanescente de floresta e capoeira, onde são considerados os seguintes parâmetros adicionais: a pressão que o vento exerce sobre a copa das árvores e o peso da vegetação sobre

a encosta, o único parâmetro excluído da análise foi ancoramento das raízes, uma vez que os planos de ruptura dos deslizamentos observados na área de estudo situavam-se abaixo das raízes (equação 14). A Figura 8.5 representa de modo esquemático, as variáveis consideradas na presença de vegetação.

(Eq. 13)

$$FS = \frac{Cs + (h_1\gamma_{nat} + h_2\gamma_{sub})\cos^2 i \tan \phi}{(h_1\gamma_{nat} + h_2\gamma_{sub} + h_2\gamma_a)\sin i}$$

(Eq. 14)

$$FS = \frac{Cs + \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_a}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \phi}{(h\gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}}$$

Onde:

FS = Fator de Segurança;

C_s = Coesão do solo (kPa);

h_a = Altura da água no solo (solo saturado), perpendicular a vertente (m);

h = Espessura do perfil de solo, perpendicular a vertente (m);

h_1 = Espessura do solo seco, perpendicular a vertente (m);

h_2 = Espessura do solo saturado, perpendicular a vertente (m);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m³);

γ_{sub} = Peso específico do solo submerso (kN/m³);

γ_a = Peso específico da água (kN/m³);

i = inclinação da vertente (graus);

Φ = Ângulo de atrito interno entre partículas de solo (graus).

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na copa das árvores (kPa);

Os valores empregados na modelagem foram extraídos da média simples dos resultados dos ensaios acima citados e foram extrapolados para toda a área (Tabela 20).

Os demais parâmetros que contemplam a presença de vegetação foram extraídos da literatura, sendo a pressão exercida pelo peso das árvores sobre a encosta de 3,6 kPa e a pressão exercida pelo vento sobre a copa das árvores de 0,31 kPa, (TABALIPA, 2008).

TABELA 20 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A CONFECÇÃO DOS MAPAS DE FS

ESPES.	COESÃO	A. ATRITO	P. ARV.	P. VENT.	P. ESP	P. ESP	P. ESP
<i>h</i>	<i>C_s</i>	<i>φ</i>	<i>σ_a</i>	<i>σ_{ve}</i>	<i>γ_{nat}</i>	<i>γ_{sat}</i>	<i>γ_{sub}</i>
1,7m	7,97kPa	19,76°	3,6kPa	0,31kPa	14,71 kN/m ³	16,98 kN/m ³	6,98 kN/m ³

FONTE: Modificado de TABALIPA (2008)

A modelagem do FS considerou ainda seis cenários plausíveis de saturação hídrica dos solos 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 70% saturado, e os dois cenários de saturação extrema 0% e 100%, tidos como hipotéticos. Os teores foram definidos a partir da umidade natural das amostras de solo extraídas nos ensaios de teor de umidade e índices de vazios, que permitiram o cálculo da saturação natural dos solos. O menor valor atribuído para um perfil natural de solo foi de 29,7% de água, com 1,25 de vazios.

Os resultados previsionais do FS contemplaram cinco classes de suscetibilidade a escorregamento de solo: muito alta ($FS < 1,00$), alta ($1,00 < FS < 1,15$), moderada ($1,15 < FS < 1,50$), baixa ($1,50 < FS < 2,00$) e muito baixa ($2,00 < FS$). Os mapas foram validados por meio de sobreposição das oito cicatrizes de deslizamentos registradas na área.

8.2.2 Chuvas Críticas e Eventos Pluviométricos Extremos

Os métodos utilizados para a definição da criticidade dos episódios de chuva registrados nas datas em que ocorreram escorregamentos de solo na área de estudo partiram da compilação e tratamento de dados dos movimentos de massa.

Entre os anos de 1998 e 2018 o município de Pato Branco registrou ao menos oito ocorrências de escorregamento translacional de solo (Tabela 21). Os eventos foram classificados de acordo com a ordem cronológica de ocorrência, georreferenciados, e caracterizados segundo o banco de dados da pesquisa. As cotas das rupturas foram coletadas da base planialtimétrica e os valores referentes à inclinação das vertentes extraídos no modelo de declividade em grau.

TABELA 21: REGISTROS DE ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO

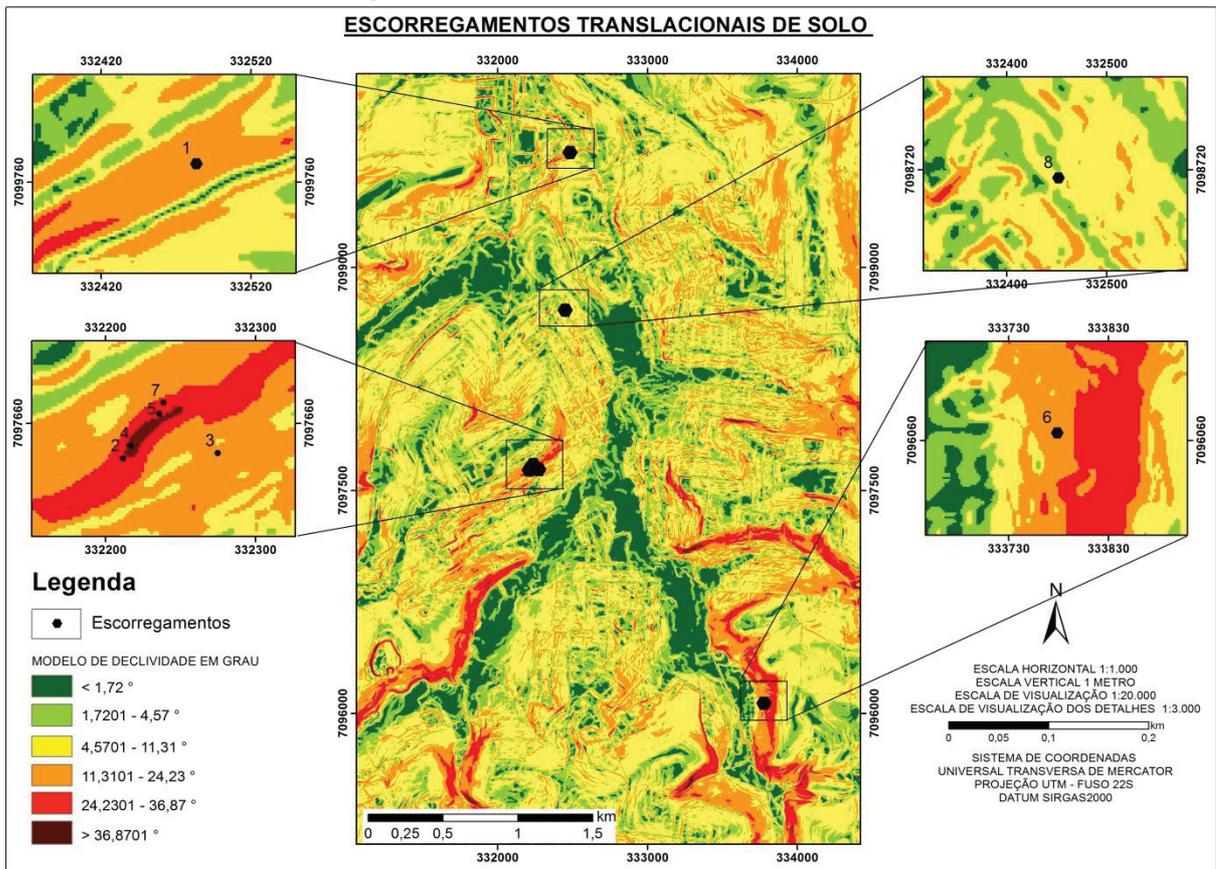
ETS n°	Data	Cota em metros	Coordenadas UTM	Declividade da encosta	Localização bairro
1	17/10/2000	745	332483/7099772	20°	Bartot
2	16/09/2013 22/09/2013	807	332255/7097667	36°	Jardim das Américas
3	02/12/2013	787	332274/709764	23°	Centro
4	08/06/2014	801	332211/7097636	39°	Centro
5	27/06/2014	801	332211/7097637	34°	Centro
6	07/11/2014	774	333778/7096068	19°	Bonatto
7	10/12/2015	807	332255/7097667	28°	Jardim das Américas
8	04/11/2017	767	332452/7098711	5°	Centro

FONTE: Modificado de DEFESA CIVIL (2018), UTFPR (2018), CPRM (2013) e DIARIO DO SUDOESTE (2017)

As localizações dos escorregamentos variam de áreas consideradas planas pelo modelo digital de declividade a encostas muito íngremes (Figura 8.6). Isso ocorre porque o relevo é mutável e em ambiente urbano encontra-se altamente suscetível a alterações antrópicas.

Na figura 8.6 os escorregamentos de solo estão sobrepostos ao modelo de declividade em grau da área de estudo. É perceptível que os acidentes ocorreram preferencialmente em relevo forte ondulado a montanhoso.

FIGURA 8.6 - LOCALIZAÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO



FONTE: A autora (2018)

O escorregamento de setembro de 2013 não tem data definida. Trata-se de um registro não oficial segundo CPRM (2013) cujos dados foram coletados da publicação intitulada “Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa, Pato Branco – Paraná”. A análise dos dados pluviométricos registrados no mês em questão evidenciou que os dias 16 e 22 apresentaram picos de chuva e índices acumulados superiores a 60 mm, medida compatível com os valores apontados nos registros dos demais eventos de escorregamento.

Dos oito episódios de movimentos de massa considerados, somente em 07/11/2014 o volume de chuva estimado até a ruptura foi acumulado em dois eventos. Os demais escorregamentos foram deflagrados com o acumulado hídrico de um único evento de até 48h de precipitação ininterrupta (Tabela 22).

Os escorregamentos de setembro de 2013, 10/12/2015 e 04/11/2017 não apresentam dados de chuva acumulada no momento da ruptura. Para efeito de cálculo foram considerados os teores máximos registrados nas datas (mm/24h).

TABELA 22 - EVENTOS DE CHUVA E ACUMULAÇÃO HÍDRICA EM ATÉ 96H ANTECEDENTES AOS ETS

Registro de ETS	Vol. Chuva Ruptura (mm AC.)	Eventos de Chuva	AC. 24h (mm/dia)	AC. 48h (mm/dia)	AC. 72h (mm/dia)	AC. 96h (mm/dia)
17/10/2000	66	1	43,5	67,4	92	120,5
16/09/2013	64,8	1	64,8	66,2	66,2	66,2
22/09/2013	61	1	61	62,8	92	92,8
02/12/2013	69,5	1	74,8	74,8	74,8	82,4
08/06/2014	57,2	1	82,8	82,8	91,6	111,4
27/06/2014	57,6	1	147,83	121,1	147,83	147,83
07/11/2014	52	2	94,4	94,4	94,6	102
10/12/2015	77,4	1	77,4	77,4	77,4	77,4
04/11/2017	59,2	1	59,2	76,6	95	117,1

FONTE: Modificado de SIMEPAR (2018)

No contexto deste trabalho, entende-se por evento pluviométrico o intervalo de tempo iniciado no instante em que a medição pluviométrica horária atinge ao menos 5 mm/h e cessa quando por quatro horas consecutivas não há registro de chuva. Evento pluviométrico extremo é entendido como episódio de chuvas isoladas ou acumulados hídricos em até 96h que superam a média prevista para o mês em que foram registrados. Da mesma forma, tem-se por chuva crítica o evento pluviométrico intenso cujo tempo estimado de recorrência é superior a um ano (Tabela 23).

TABELA 23 – CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS QUANTO A INTENSIDADE DA PRECIPITAÇÃO

CARACTERÍSTICA DO EVENTO	CLASSIFICAÇÃO
Chuva isolada ou acumulada em até 96h > média prevista para o mês	Evento Extremo
Evento pluviométrico intenso com $Tr > 1$ ano	Chuva Crítica

FONTE: A autora (2018)

As análises envolvendo a pluviosidade foram realizadas a partir dos dados históricos de precipitação local, disponibilizados pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). A base fornecida pelo SIMEPAR possibilitou a elaboração dos gráficos dos teores de chuva acumulados nas horas antecedentes aos eventos de escorregamento, assim como os índices pluviométricos acumulados em até quatro dias anteriores. A coleta de dados ocorreu na estação pluviométrica localizada na BR 158 – KM 497, coordenadas geográficas 26°06'59" S, 52°40'59" W, e altitude de 721,80m do município de Pato Branco entre os anos de 1998 e 2018 e contém uma vasta gama de informações registradas de hora em hora de pluviosidade, temperatura, velocidade dos ventos e umidade relativa do ar.

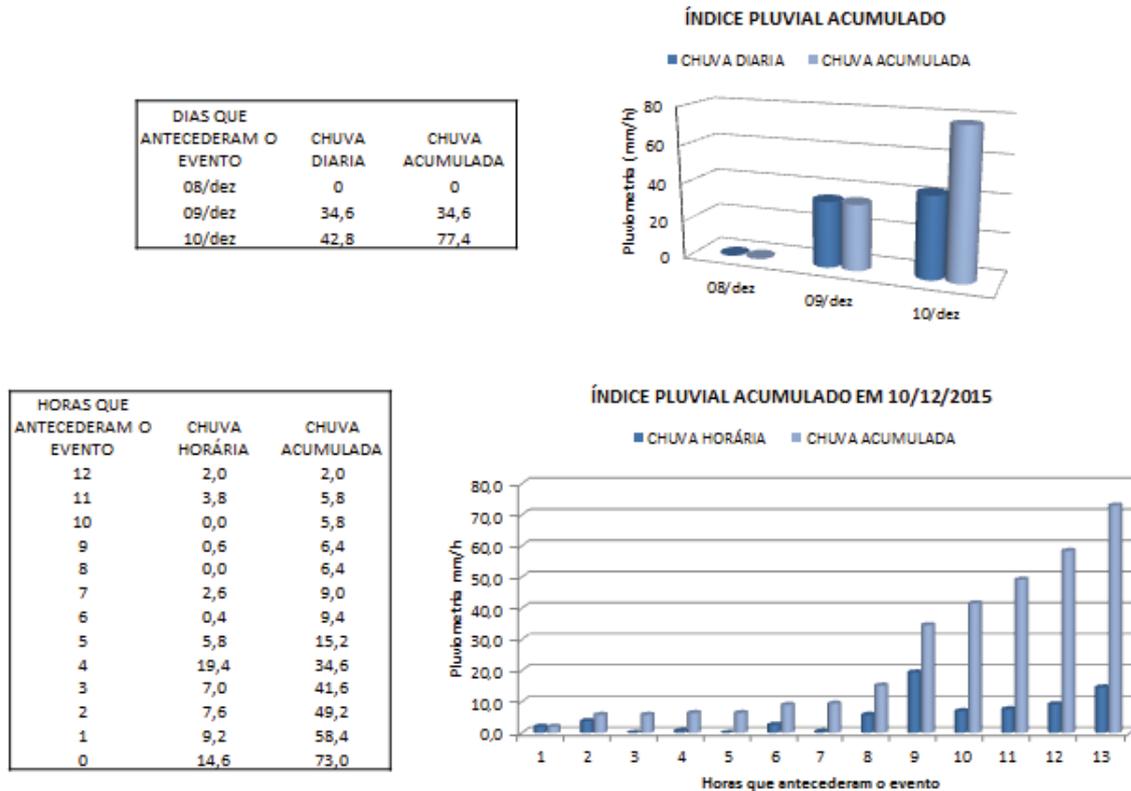
Os dados foram segregados em períodos (meses e dias) e posteriormente classificados de acordo com o grau de interesse da pesquisa. Foram então separados os dias com registro de chuva, ainda que insignificantes para a deflagração de movimentos de massa, em seguida se deu a identificação dos dias em que o município registrou a ocorrência de escorregamentos de solo. As informações foram tabeladas em compilações de horas antecedentes a ruptura e dias anteriores aos acidentes para verificação das pluviometrias máximas em ambos os casos, os valores foram trabalhados em forma de gráficos (Figura 8.7).

Para tal verificação os dados foram agrupados considerando o dia de maior incidência de chuva, sendo o índice verificado somado ao registro das 24 horas antecedentes, 48h, 72h e 96h sucessivamente. Em posse dos máximos pluviométricos acumulados no prazo de até 96h, foram identificados os picos horários de cada evento, ou seja, período em horas durante um único evento em que a intensidade da chuva se sobressaiu consideravelmente. Concluída esta etapa foi possível estabelecer através de relação matemática o índice pluviométrico por tempo pré-determinado (mm/h) e o consecutivo tempo de retorno previsto para cada evento.

As análises contemplaram também os dias em que os episódios de chuva ultrapassaram os índices dos limiares de ruptura dos ETS catalogados, sem incidência de acidentes. Foram selecionados oito eventos de chuvas isoladas, dos quais três com teor de chuva diário acumulado superior a 100mm. A tabela 05 apresenta esses dados e os picos de chuva concentrados em diferentes intervalos

de tempo (horas), por fim para efeito de comparação estão dispostas as médias pluviométricas esperadas para os meses das ocorrências.

FIGURA 8.7 – COMPILAÇÃO DE DADOS DO ETS DE 10/12/2015



FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

TABELA 24 - EXEMPLO DE DIAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS INTENSAS, SEM REGISTROS CONHECIDOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Dia	Média Mensal	Ev. Pluviométrico Diário	AC. Evento (mm/dia)	Picos de Chuva (mm/horas)
14/11/2007	180,3	1	88,2	85,2/10h
12/10/2009	241,5	1	78,4	78,4/9h
22/04/2010	174,8	1	360,6	129,0/10h
26/04/2010	174,8	1	66,4	32,5/1h
11/03/2011	146,7	1	147,2	91,2/2h
28/03/2011	146,7	1	86,6	47,6/2h
30/03/2011	146,7	1	66,2	55,4/2h
27/02/2016	178,2	1	108,8	97,8/4h

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

Para validação dos dados de chuva no que diz respeito aos acumulados diários, visando estabelecer a precipitação representativa da área como um todo para os dias em que foram registrados movimentos de massa e assim minimizar os erros de medição pontual dos pluviômetros, foram coletados dados de precipitação diários de 4 das 11 estações meteorológicas localizadas na cidade, inseridas no perímetro urbano: Pato Branco e Passo da Ilha operadas pela Agência Águas do Paraná, Pato Branco – SE operada pela Copel, e Alvorada operada pelo CEMADEN. Os dados utilizados encontram-se disponíveis para download no site da Agência Nacional das Águas (ANA), e possuem um compilado de informações meteorológicas de até 45 anos de observações.

Os métodos determinísticos aplicados na definição dos índices pluviométricos intensos ou chuva crítica para Pato Branco partem de duas abordagens distintas. O modelo proposto por Fendrich (2003) considera a relação entre as quatro características fundamentais da chuva: intensidade, duração, frequência e distribuição.

Já o modelo de Dietrich e Montgomery (1998) utilizado para designar o grau de estabilidade de uma encosta, é baseado na combinação dos modelos de estabilidade de encosta infinita (balizado por variáveis físicas), com o modelo hidrológico de estado uniforme, que considera a taxa de recarga uniforme em função da área de recarga a montante (O'LOUGHLIN, 1986). A metodologia desses autores permite a definição da precipitação crítica (Q_c) para uma determinada encosta, associando dados geotécnicos e hidrológicos da vertente e dados de vazão e tempo de precipitação de um determinado evento pluviométrico.

Segundo Fendrich (2003) a relação entre Intensidade, Duração e Frequência, que se dá a partir de dados históricos de estações meteorológicas e postos pluviométricos, pode ser representada graficamente ou por meio da equação 15, que tem como fórmula geral:

(Eq. 15)

$$i = \frac{K \times T r^m}{(t+b)^n}$$

Onde:

i = Intensidade máxima da precipitação (mm/h);

Tr = tempo de recorrência (anos);

t = tempo de duração da chuva (min); e,

K, b, m e n = Parâmetros adimensionais relativos à estação pluviográfica, obtidos por análises estatísticas.

A estação pluviográfica de Pato Branco registrada pela ANA sob o código 02652035 localiza-se na cota de elevação 700m e é coordenada pela IAPAR. A equação de chuvas intensas de Pato Branco (equação 16) foi determinada em 1991, a partir de 11 anos de observação os dados da estação local entre os anos 1979 a 1989.

(Eq. 16)

$$i = \frac{879,43 \times Tr^{0,152}}{(t+9)^{0,732}}$$

Nesse contexto a pesquisa considerou os tempos de recorrência de 1 a 20 anos e os tempos de duração em minutos de 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 360 (6h), 720 (12h), 1440 (24h), 2880 (48h), 4320 (72h) e 5760 (96h).

A análise da chuva crítica (Q_c) proposta por Dietrich e Montgomery (1998) está condicionada a infiltração de toda a chuva precipitada sobre a vertente (FIORI e CARMIGNANI, 2009). A modelagem via QC considera a influência da vegetação no processo de instabilidade, a transmissividade do solo (m^2/dia), a área de contribuição da bacia (m^2), o tempo de precipitação (min) e a vazão da chuva (mm/h) além dos índices físicos dos solos e da encosta.

Assim como a modelagem do FS, a definição do índice pluvial crítico (Q_c) utiliza equações distintas para cenários com ou sem vegetação. A equação 17 reflete o comportamento da área na presença de vegetação, e caso a vertente não apresente cobertura vegetal anulam-se os termos (S_r, T, σ_a e σ_{ve}), conforme equação 18.

(Eq. 17)

$$Q_c = \frac{T_m \text{ seni}}{a/b} \left[\frac{C_s + S_r + T(\text{sen}\theta \tan\phi + \text{cos}\theta) - \sigma_{ve}}{\gamma_a h \text{ cos}^2 i \tan\phi} + \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi}\right) \left(\frac{\gamma_{nat}}{\gamma_a} + \frac{\sigma_a}{h\gamma_a}\right) \right]$$

(Eq. 18)

$$Q_c = \frac{T_m \text{ seni}}{a/b} \left[\frac{C_s}{\gamma_a h \text{ cos}^2 i \tan\phi} + \frac{\gamma_{nat}}{\gamma_a} \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \phi}\right) \right]$$

Onde:

Q_c = Chuva crítica;

T_m = Transmissividade do solo (m^2/dia);

a = Área de contribuição da bacia (m^2);

b = Comprimento da seção da curva de nível (m);

C_s = Coesão do solo (kPa);

S_r = Coesão devido às raízes (kPa);

T = Tensão suportada pelas raízes (kPa);

γ_{nat} = Peso específico natural do solo (kN/m^3);

γ_a = Peso específico da água (kN/m^3);

h = Espessura do perfil de solo, perpendicular a vertente (cm);

i = inclinação da vertente (graus);

ϕ = Ângulo de atrito interno entre partículas de solo (graus);

θ = Ângulo raiz/plano de escorregamento (graus);

σ_a = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

σ_{ve} = Pressão exercida pelo vento na copa das árvores (kPa).

Além dos valores apresentados na tabela 20, para o cálculo do Q_c foram utilizados os seguintes parâmetros: área de contribuição da bacia (m^2) = 250 m^2 ; comprimento da seção de curva de nível (m) = 1 metro; Transmissividade (m^2/dia) =

61,88 m²/dia; Coesão devido as raízes (Sr) = 5,9 kPa; Tensão suportada pelas raízes (T) = 5,0kPa; e ângulo raiz/plano de escorregamento (°) = 30°.

O cruzamento dos modelos propostos Dietrich e Montgomery (1998) e Fendrich (2003) permite a previsão de tempo de recorrência de eventos de escorregamento substituindo (i) por (Qc). Utilizando a equação de chuvas intensas para Pato Branco, tem-se:

(Eq. 19)

$$Q_C = \frac{879,43 \times Tr^{0,152}}{(t+9)^{0,732}}$$

Além das análises determinísticas, foram realizadas observações empíricas baseadas na proposta de Guidicini e Iwasa (1976). Esses autores utilizaram registros pluviométricos e ocorrências de escorregamentos de diferentes regiões do Brasil e concluíram que, quando a pluviometria total do evento excede a 12% do PAM (pluviosidade anual média), escorregamentos ocorrem independentemente das condições pluviométricas antecedentes ao evento, porém se a pluviometria total do evento corresponder entre 8 e 12% da PAM, escorregamentos ocorrem dependendo do histórico pluviométrico e se a pluviometria total do evento for inferior a 8% da PAM, é improvável a deflagração de escorregamentos.

Guidicini e Iwasa (1976) consideraram a periodicidade, a intensidade (antes e durante o evento) e a duração das chuvas. Além disso, estabeleceram coeficientes pluviométricos cujos valores indicariam diferentes “níveis de periculosidade” relativos à ocorrência de escorregamentos. Os coeficientes foram definidos do seguinte modo: CC - Coeficiente de ciclo ou histórico da pluviosidade (razão entre o registro acumulado até a data do evento e a média anual da pluviosidade); CE - Coeficiente de episódio (razão entre o registro pluviométrico do episódio e a média anual da pluviosidade); e CF - Coeficiente final (= CC + CE).

A correlação dos dados de FS e índices pluviométricos críticos se deu de forma empírica. As cicatrizes foram sobrepostas aos mapas de suscetibilidade produzidos e os valores de FS verificados nos pontos de ruptura foram tabelados, assim como os dados de Qc e índices críticos. O cruzamento das tabelas permitiu a

verificação dos dias em que os índices pluviométricos críticos ou extremos para Pato Branco coincidiram com a deflagração de movimentos de massa.

8.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto aos escorregamentos, as cicatrizes das rupturas encontram-se dispersas na área de estudo ocorrendo preferencialmente em áreas declivosas de relevo montanhoso a escarpado. Uma localidade dentre as demais chama a atenção pelo número de ocorrências. Dos oito registros de ETS, cinco ocorreram em uma encosta íngreme com distanciamento entre pontos inferior a 50 metros. A declividade aferida pelo modelo varia de 22 a 39°. Embora o primeiro escorregamento datado seja de 2013 imagens anteriores evidenciam a presença de cicatrizes na área, além da presença de obras de contenção (murros de arrimo e gabião), que corroboram com a classificação da área como naturalmente instável (Figura 8.8).

FIGURA 8.8 – ENCOSTA NATURALMENTE INSTÁVEL



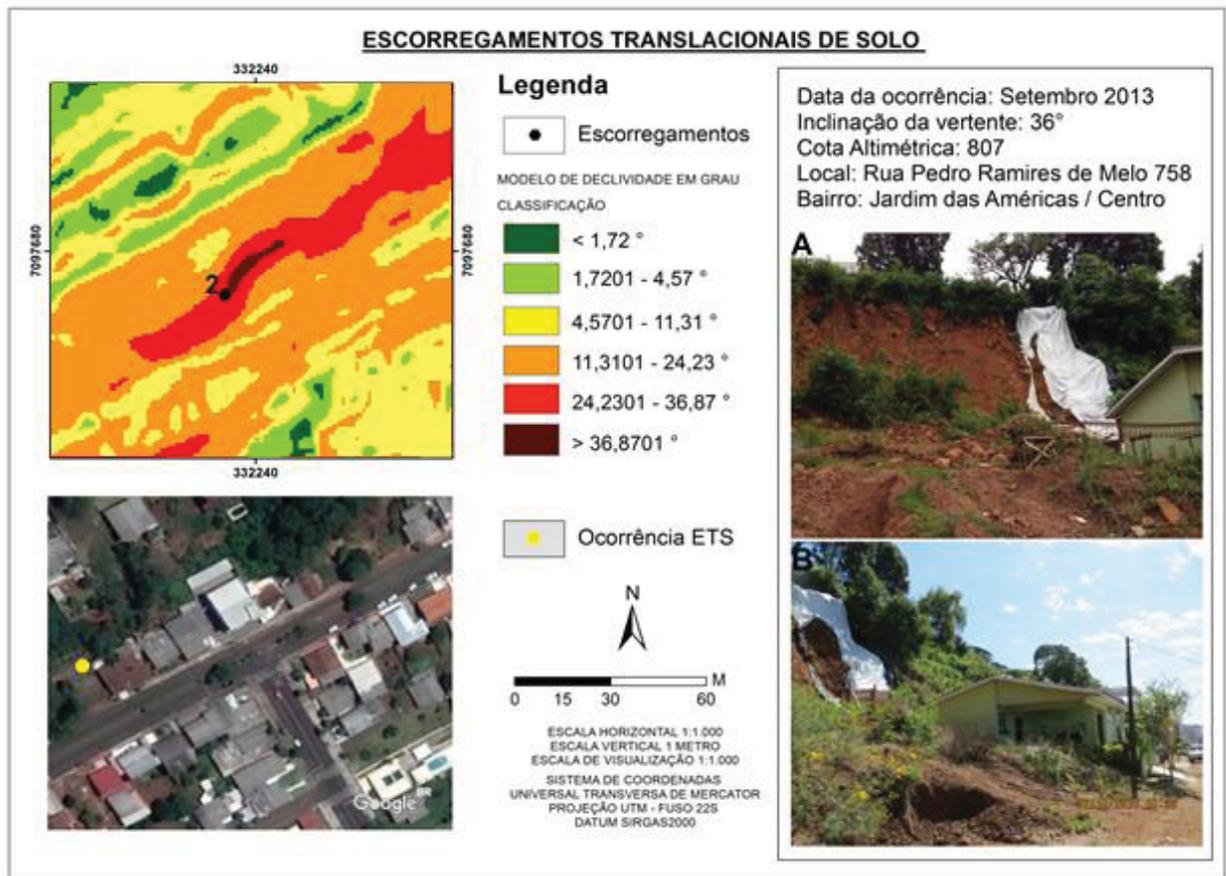
FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018)

A figura 8.8 apresenta a visão em planta da Rua Pedro Ramires de Melo, evidenciando a linha de base da encosta densamente povoada, e o perfil esquemático representando a inclinação da vertente. Apresenta ainda indícios da instabilidade local como na imagem “C” coletada no banco de imagens da Google Street View (2011), que contempla uma cicatriz de ruptura recente, esse ponto voltou a deslizar ao menos outras duas vezes. A rua de mão dupla apresenta um desnível de cerca de 3 metros. O talude central é vegetado e ao longo de sua extensão existe um muro linear de gabião de cerca 70 metros. Já na parte elevada da rua se evidenciam terrenos tratados com obras geotécnicas de estabilização, como muros de arrimo.

A vertente apresenta características de relevo montanhoso/escarpado. Trata-se de uma encosta retilínea e alongada de direção NE - SW. As imagens aéreas evidenciam uma linha paralela à encosta densamente povoada, onde diversos segmentos do sopé da vertente foram removidos para melhor aproveitamento da profundidade do terreno. Comumente as propriedades apresentam nos fundos dos imóveis taludes muito íngremes de solo exposto ou com uma pequena cobertura vegetal de médio porte no topo da vertente, o que intensifica a instabilidade da encosta devido ao acréscimo do peso da vegetação, que atua como esforço solicitante. As figuras 8.9 e 8.10 apresentam detalhes dos escorregamentos de setembro de 2013, e 08 e 27/06/2014.

No início do ano de 2013 a construção de um prédio de três andares agravou a condição de instabilidade da encosta. Durante a execução da obra parte do sopé da vertente foi removido e um arrimo foi tardiamente implantado. Foram registrados quatro movimentos de massa no local após o início da obra, sendo três deles deflagrados após a execução de um muro de arrimo, construído nos fundos do empreendimento com intuito de estabilizar a encosta.

FIGURA 8.9 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE SETEMBRO DE 2013



FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); a) Fotografia acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa; b) Modificado de CPRM (2013).

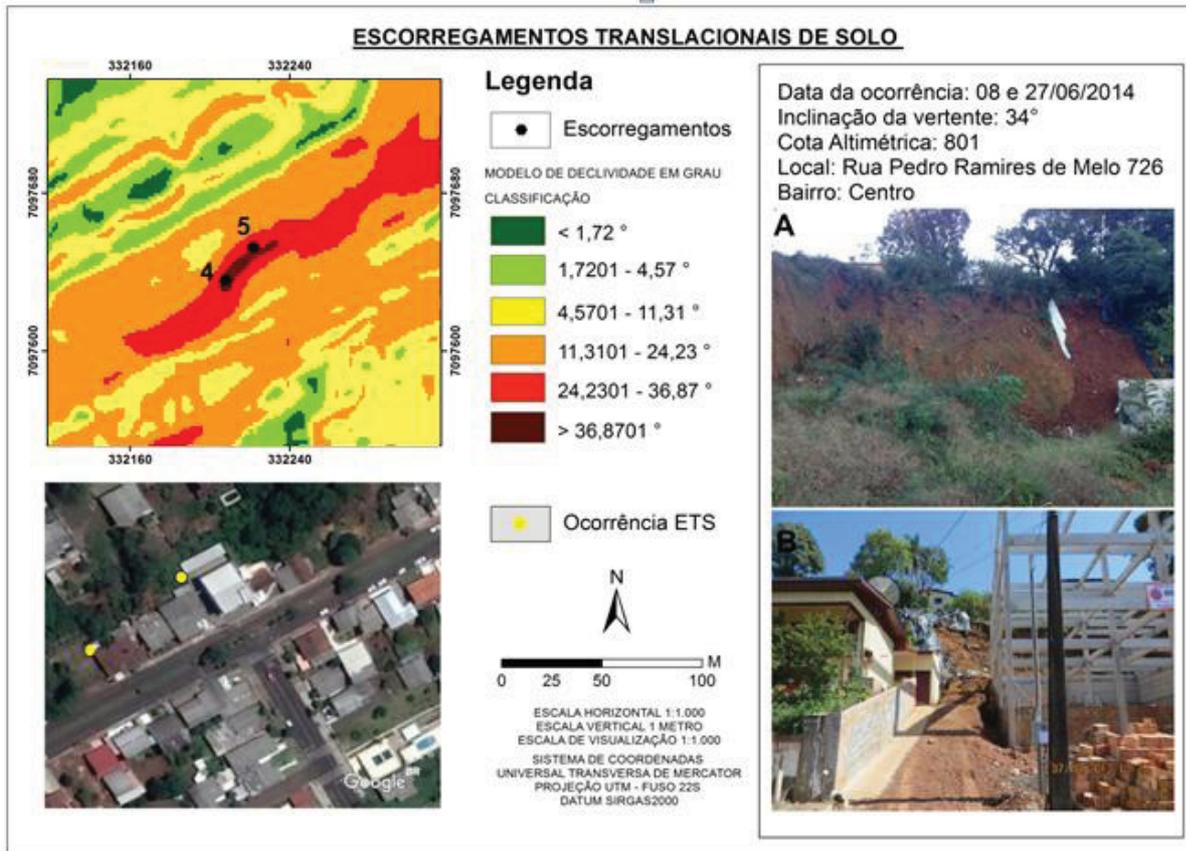
8.3.1 Fator de Segurança

O modelo preditivo do fator de segurança permitiu a análise das vertentes quando submetidas a oito cenários distintos de saturação do solo. Para todas as análises foi considerada a influência que a vegetação exerce sobre a encosta. O aumento consecutivo da saturação hídrica do solo representa a continuidade de um evento pluviométrico extensivo em até 96h, dessa forma os cenários sequenciais configuram o acúmulo hídrico da área como progressivo.

As imagens inseridas na figura 8.10 evidenciam a vista frontal da cicatriz. No canto direito da imagem “A” é possível identificar o extremo do muro de arrimo construído atrás de uma edificação de 3 andares. A imagem “B” datada de outubro

de 2013 retrata uma cicatriz recente, esse local voltou a deslizar cerca de 9 meses depois, em junho de 2014.

FIGURA 8.10 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DOS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO DE 08 E 27/06/2014

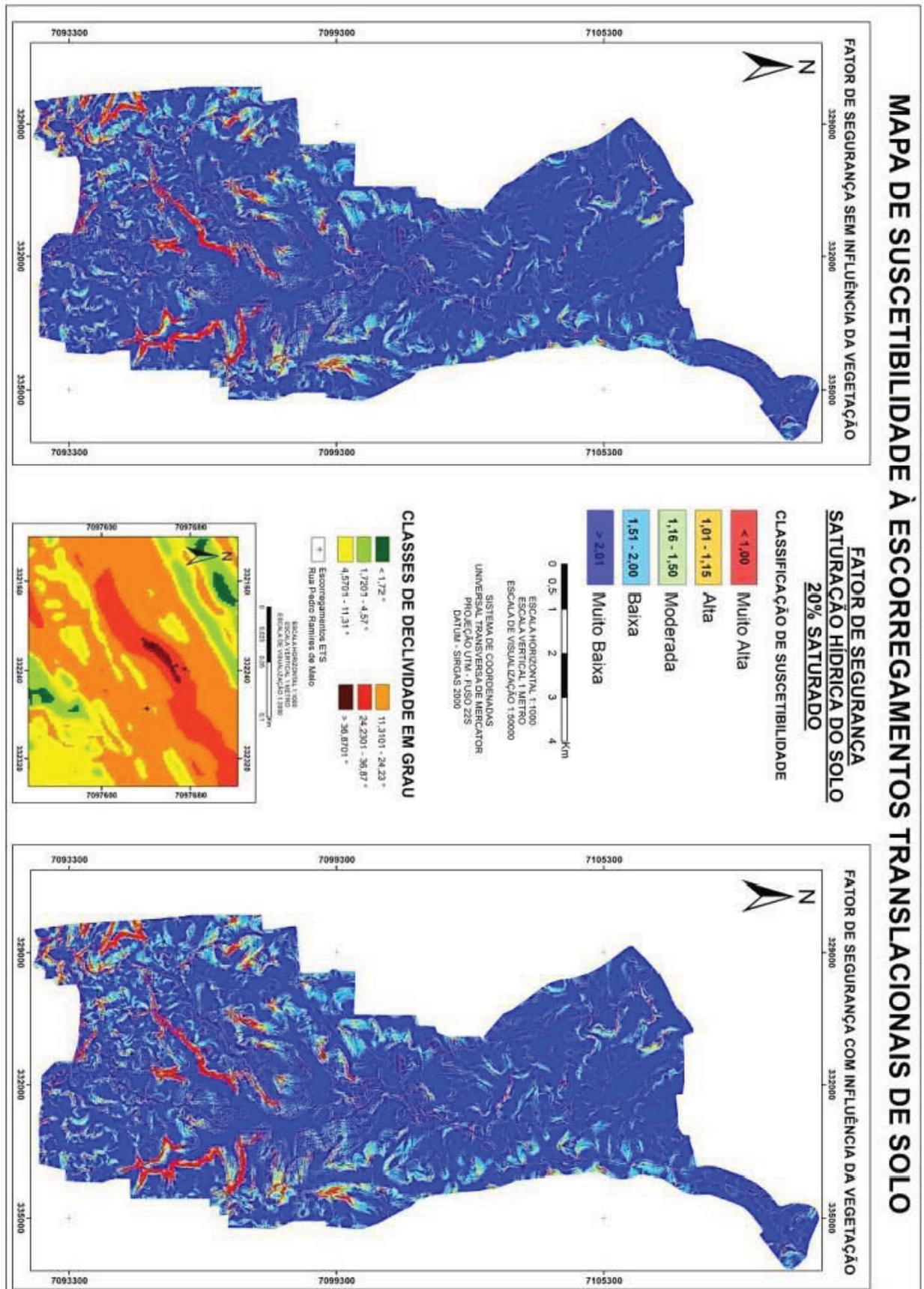


FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018); a) Fotografia acervo pessoal Ney Lyzandro Tabalipa; b) Modificado de CPRM (2013).

A modelagem empregada na análise da estabilidade das vertentes resultou em índices discretizados em cinco classes de suscetibilidade. A classe que compreende valores de $FS < 1,00$ representa áreas de muito alta suscetibilidade a escorregamentos de solo e sucessivamente: $1,00 < FS < 1,15$ alta, $1,15 < FS < 1,5$ moderada, entre $1,5 < FS < 2,0$ baixa e $FS > 2,0$ muito baixa.

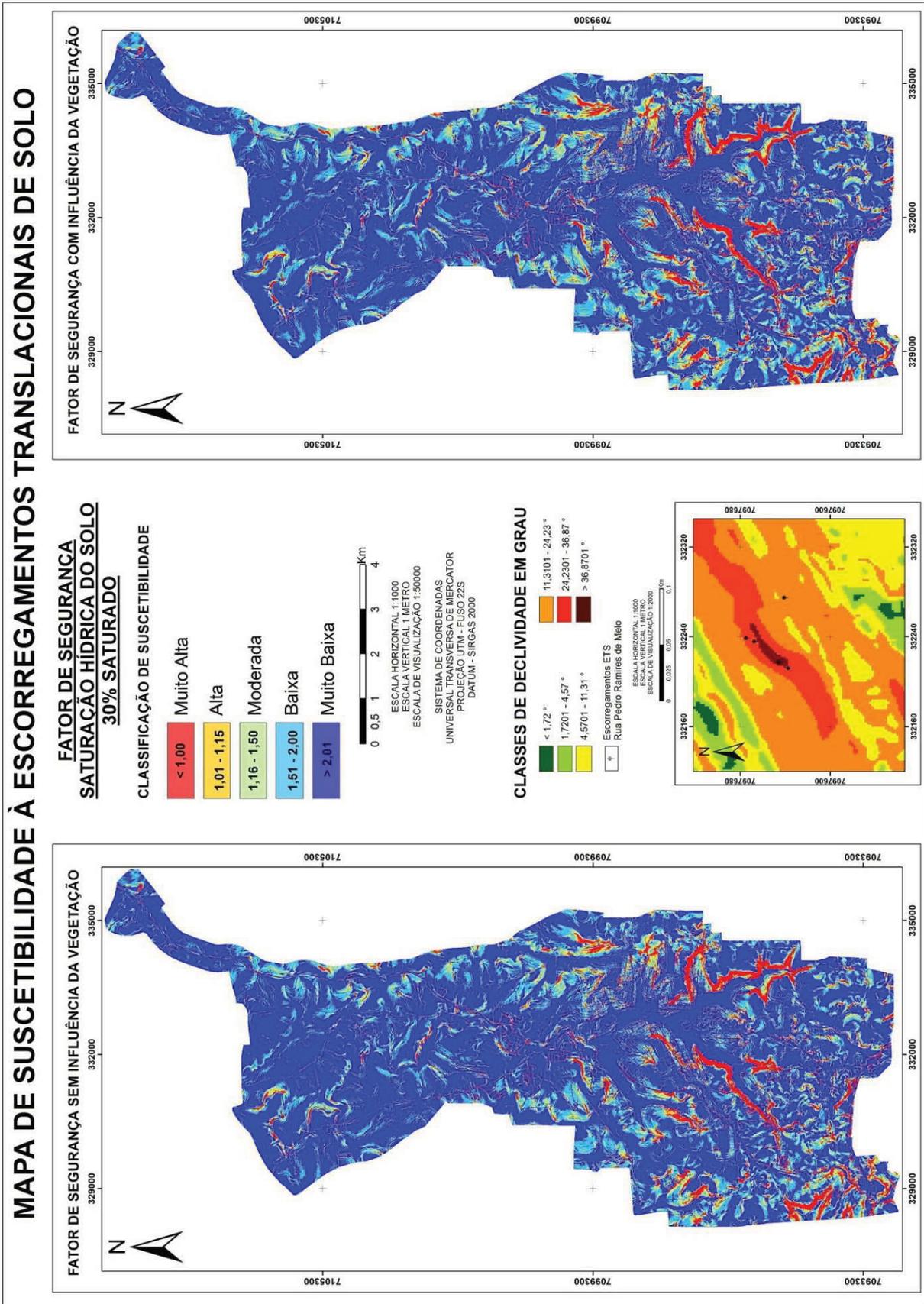
As figuras 8.11 a 8.16 retratam a evolução dos cenários plausíveis de saturação hídrica dos solos de 20 a 70%. Os mapas de suscetibilidade a escorregamento translacional de solo apresentam duas pranchas comparativas, sendo a prancha esquerda a representação da área sem cobertura vegetal, e a prancha direita a área quando considerada a influência da vegetação.

FIGURA 8.11 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 20 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO



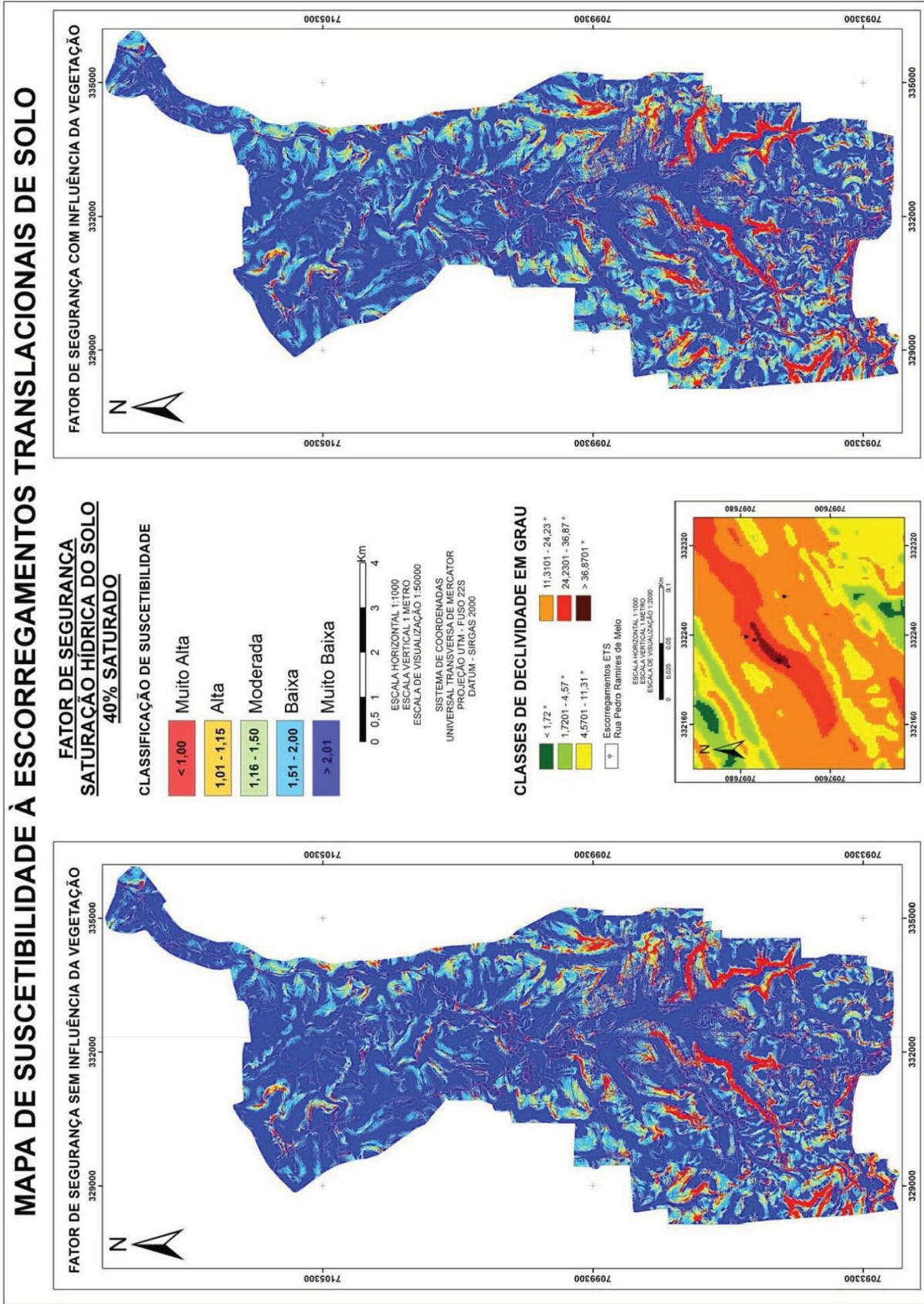
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 8.12 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 30 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO



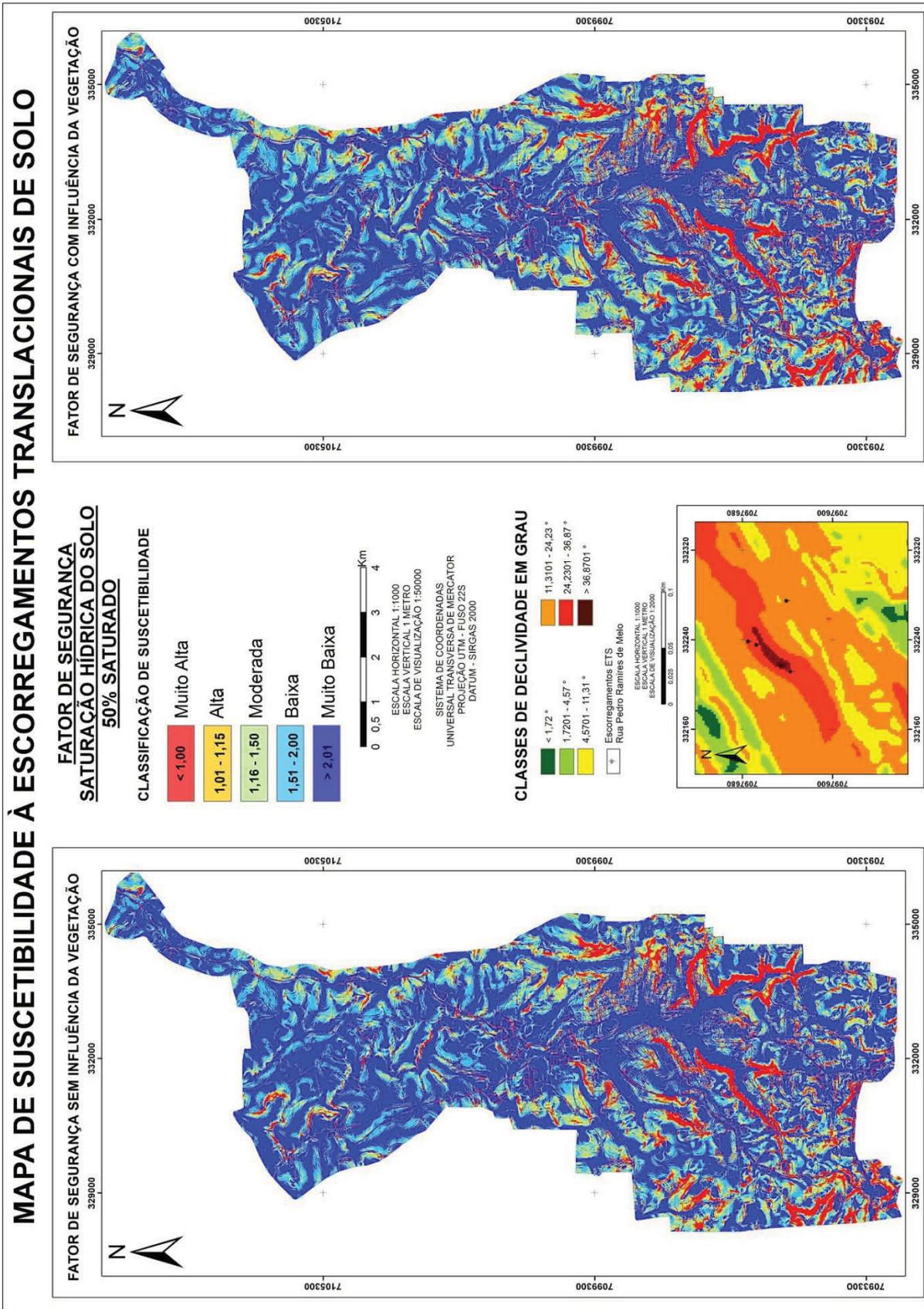
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 8.13 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 40 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO



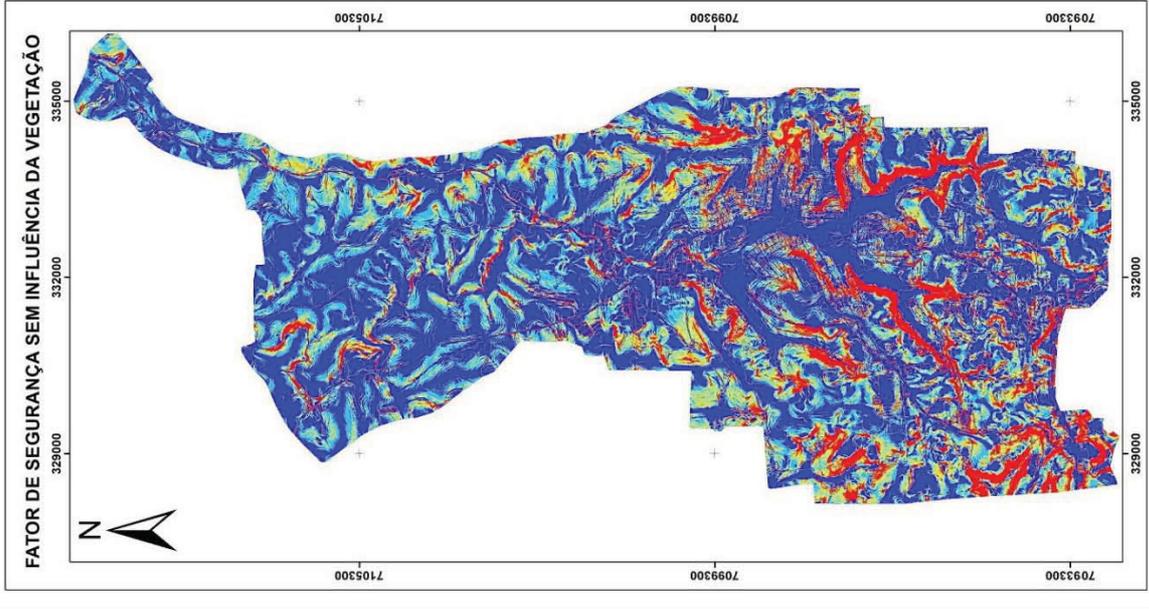
FONTE: A autora (2018)

FIGURA 8.14 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 50 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO



FONTE: A autora (2018)

MAPA DE SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO



FATOR DE SEGURANÇA SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO 60% SATURADO

CLASSIFICAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE

< 1,00	Muito Alta
1,01 - 1,15	Alta
1,16 - 1,50	Moderada
1,51 - 2,00	Baixa
> 2,01	Muito Baixa



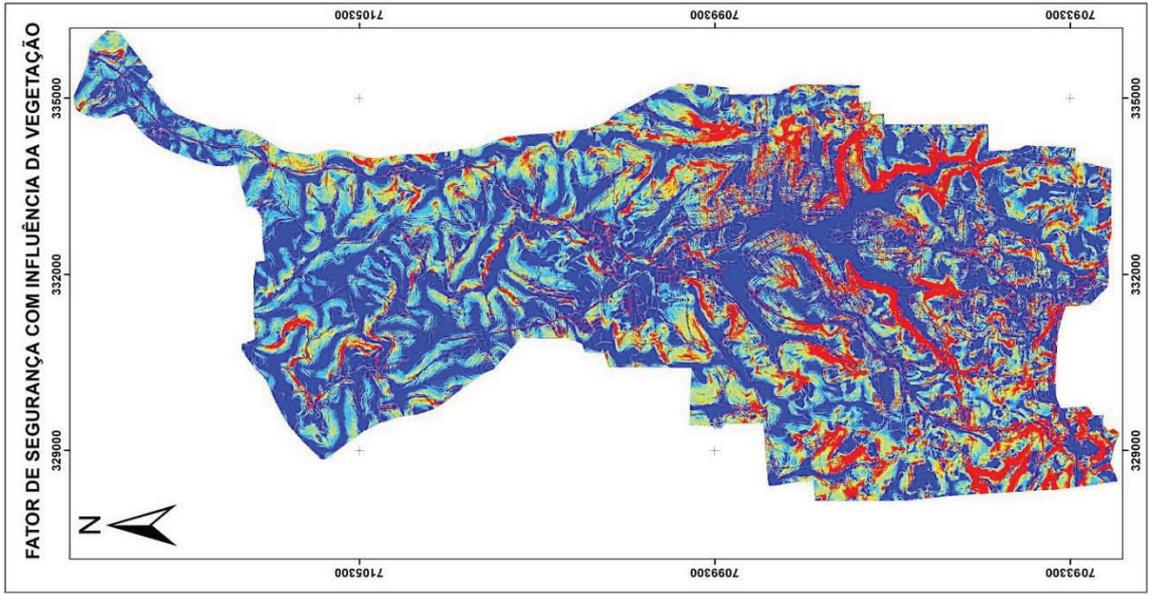
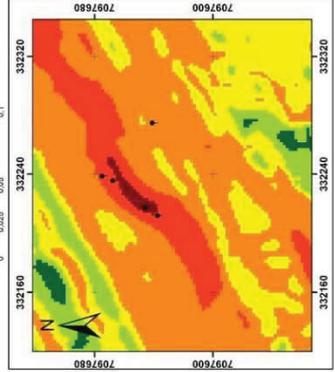
ESCALA HORIZONTAL 1:1000
 ESCALA VERTICAL 1 METRO
 ESCALA DE VISUALIZAÇÃO 1:50000
 SISTEMA DE COORDENADAS
 UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 PROJEÇÃO UTM - FUSO 22S
 DATUM - SIRGAS 2000

CLASSES DE DECLIVIDADE EM GRAU

< 1,72 °	11,3101 - 24,23 °
1,7201 - 4,57 °	24,2301 - 36,87 °
4,5701 - 11,31 °	> 36,8701 °

Escorregamentos ETS
 Rua Pedro Ramires de Melo

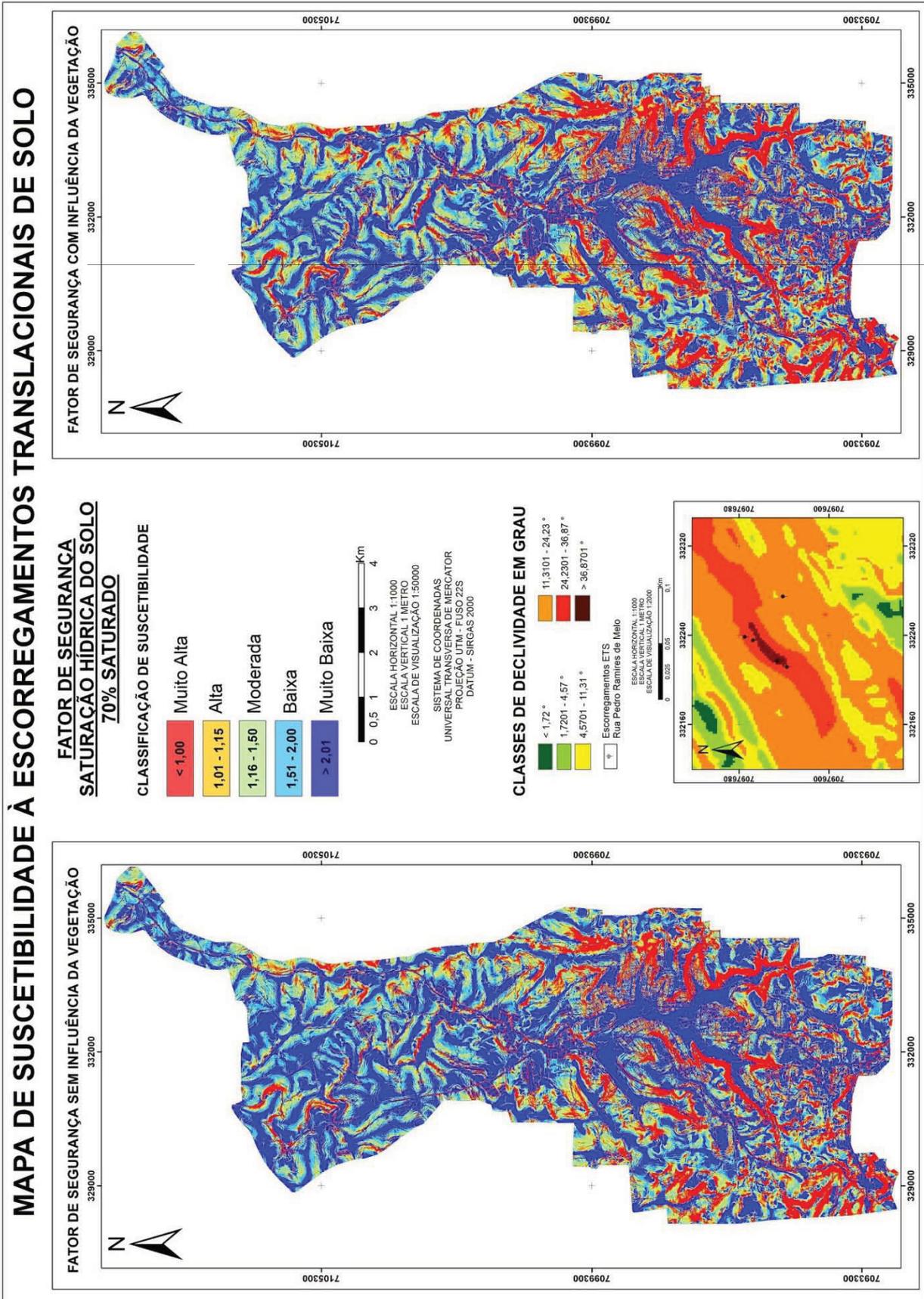
ESCALA HORIZONTAL 1:1000
 ESCALA VERTICAL 1 METRO
 ESCALA DE VISUALIZAÇÃO 1:5000



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 8.15 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 60 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO

FIGURA 8.16 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 70 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO

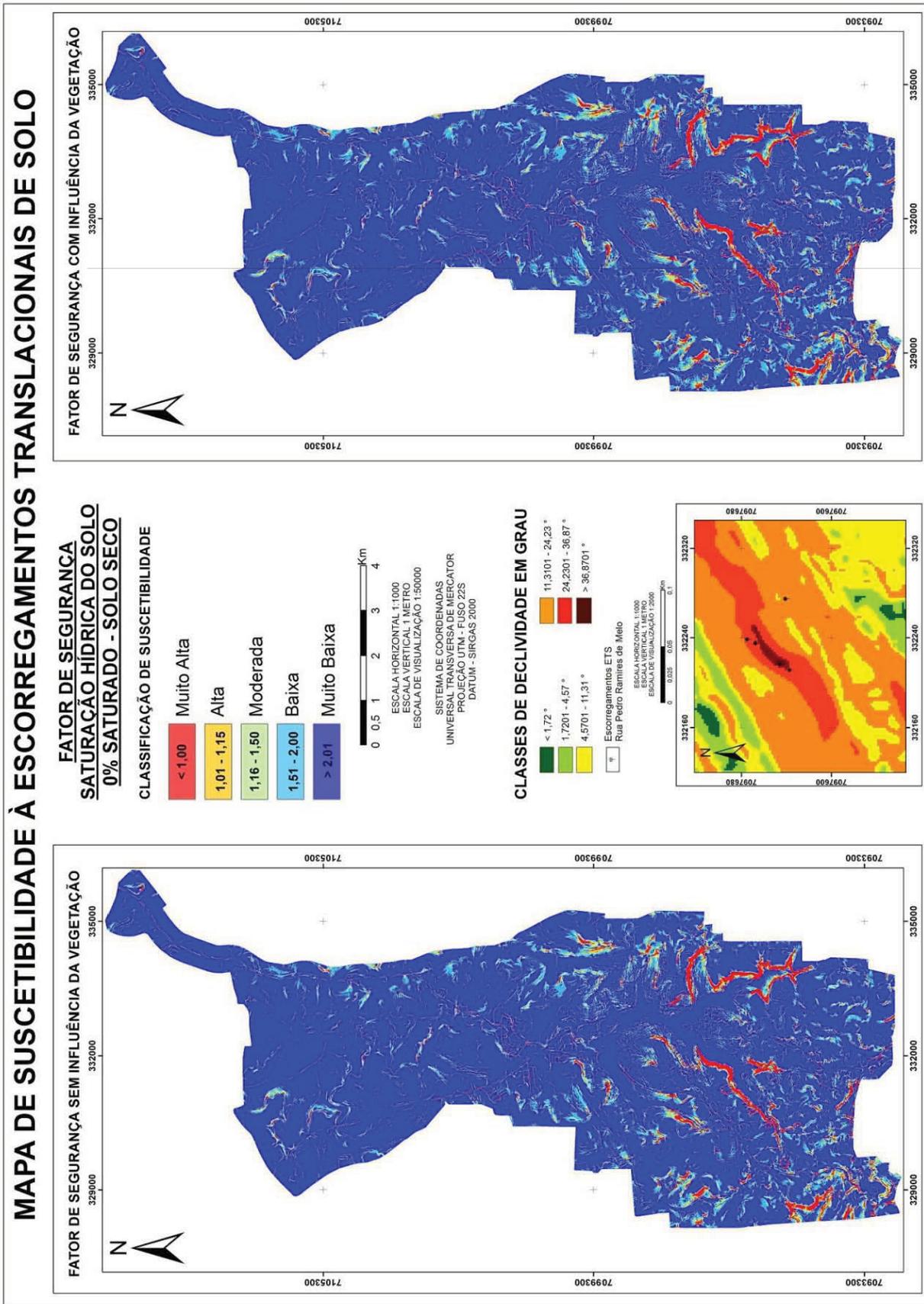


Na figura 8.13, que representa o cenário de 40% de saturação hídrica, 10,7% da área urbana apresenta $FS < 1,00$, e cerca de 4% encontra-se na classe de valores de FS entre 1,00 e 1,15. Segundo a modelagem do FS se 40% do perfil do solo estiver preenchido por água, aproximadamente 15% da área de estudo será altamente suscetível a escorregamentos translacionais de solo.

Quando analisado o cenário de 60% de saturação hídrica, 22,4% da área de estudo se insere na classe de muito alta suscetibilidade a ETS, e cerca de 9,2% encontra-se altamente suscetível. Para 60% de saturação do perfil do solo, 31,6% da área de estudo será suscetível a escorregamentos translacionais de solo.

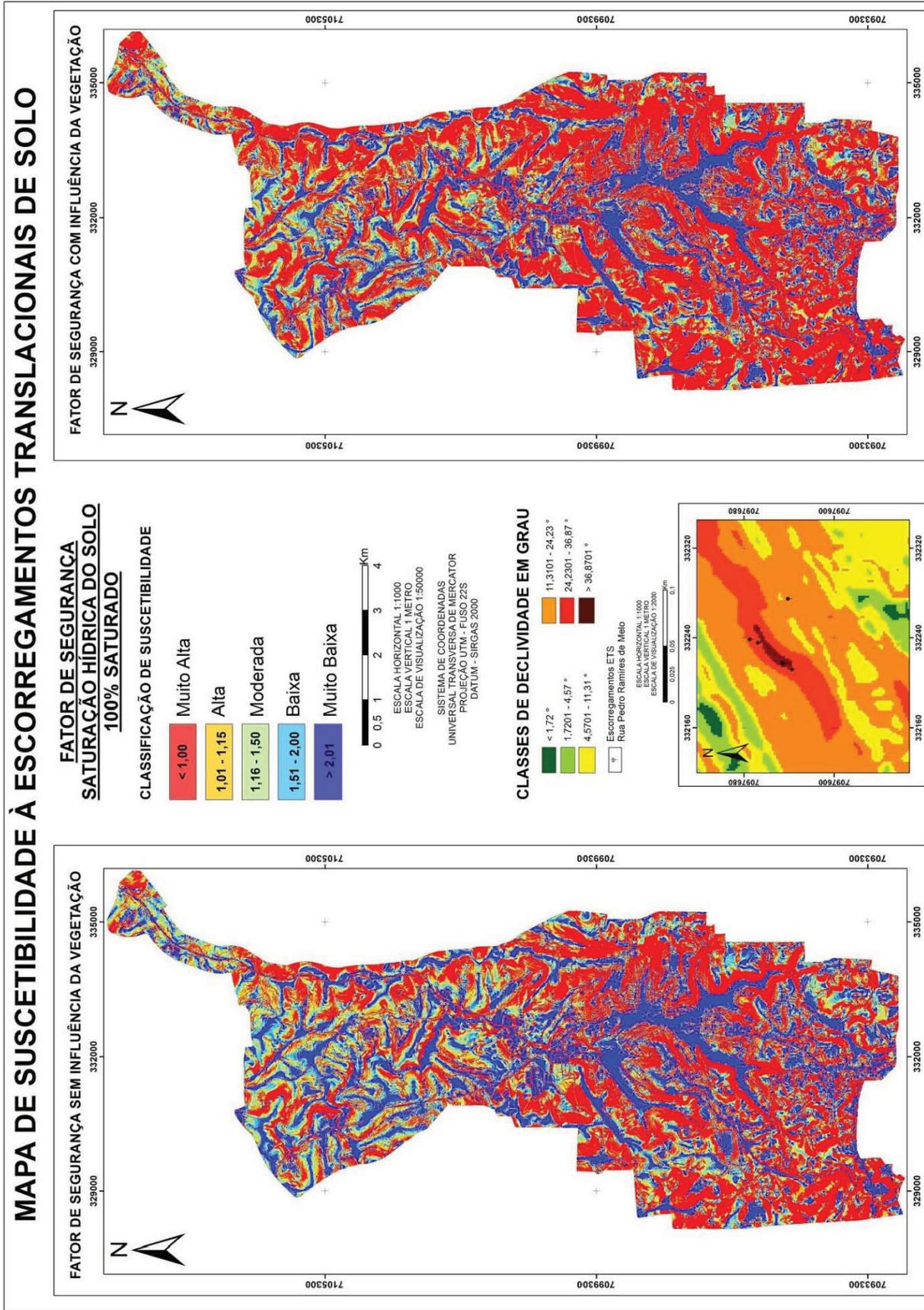
As figuras 8.17 e 8.18 retratam os cenários extremos de saturação hídrica dos solos, 0 e 100% respectivamente.

FIGURA 8.17 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 0 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO



FONTE: A autora (2018)

FIGURA 8.18 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS DE SOLO - 100 % DE SATURAÇÃO HÍDRICA DO SOLO

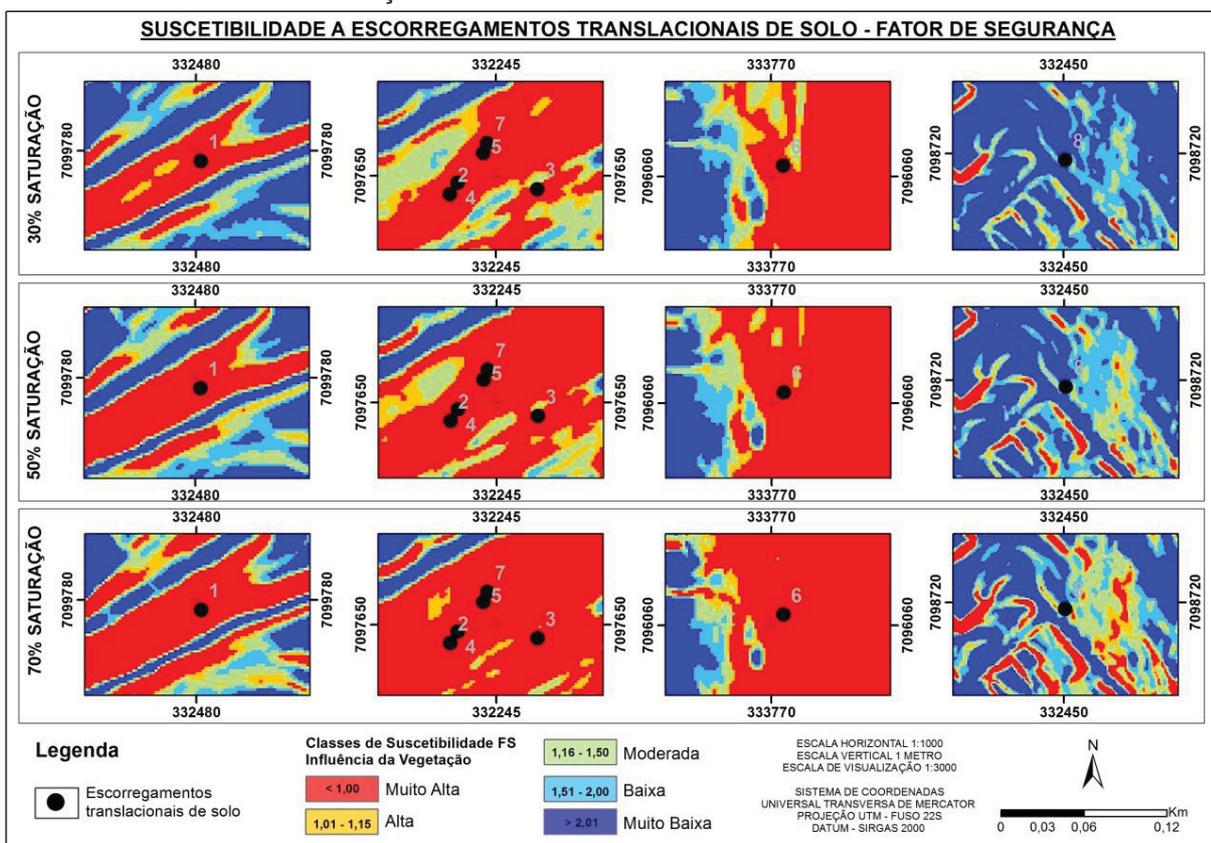


FONTE: A autora (2018)

A sobreposição dos escorregamentos catalogados ao modelo preditivo permitiu a verificação de compatibilidade do fator de segurança com os eventos. Constatou-se que 87,5% das áreas de deslizamento coincidiram com a classe de muito alta suscetibilidade, ou de FS inferior a 1,00, em solos 30% saturados.

A figura 8.19 retrata os cenários de 30%, 50% e 70% de saturação dos solos, sobrepostos pelos ETS, segundo a numeração cronológica adotada nessa pesquisa.

FIGURA 8.19 – VALIDAÇÃO DO MODELO PREDITIVO DE FATOR DE SEGURANÇA PELA SOBREPOSIÇÃO DE CICATRIZES



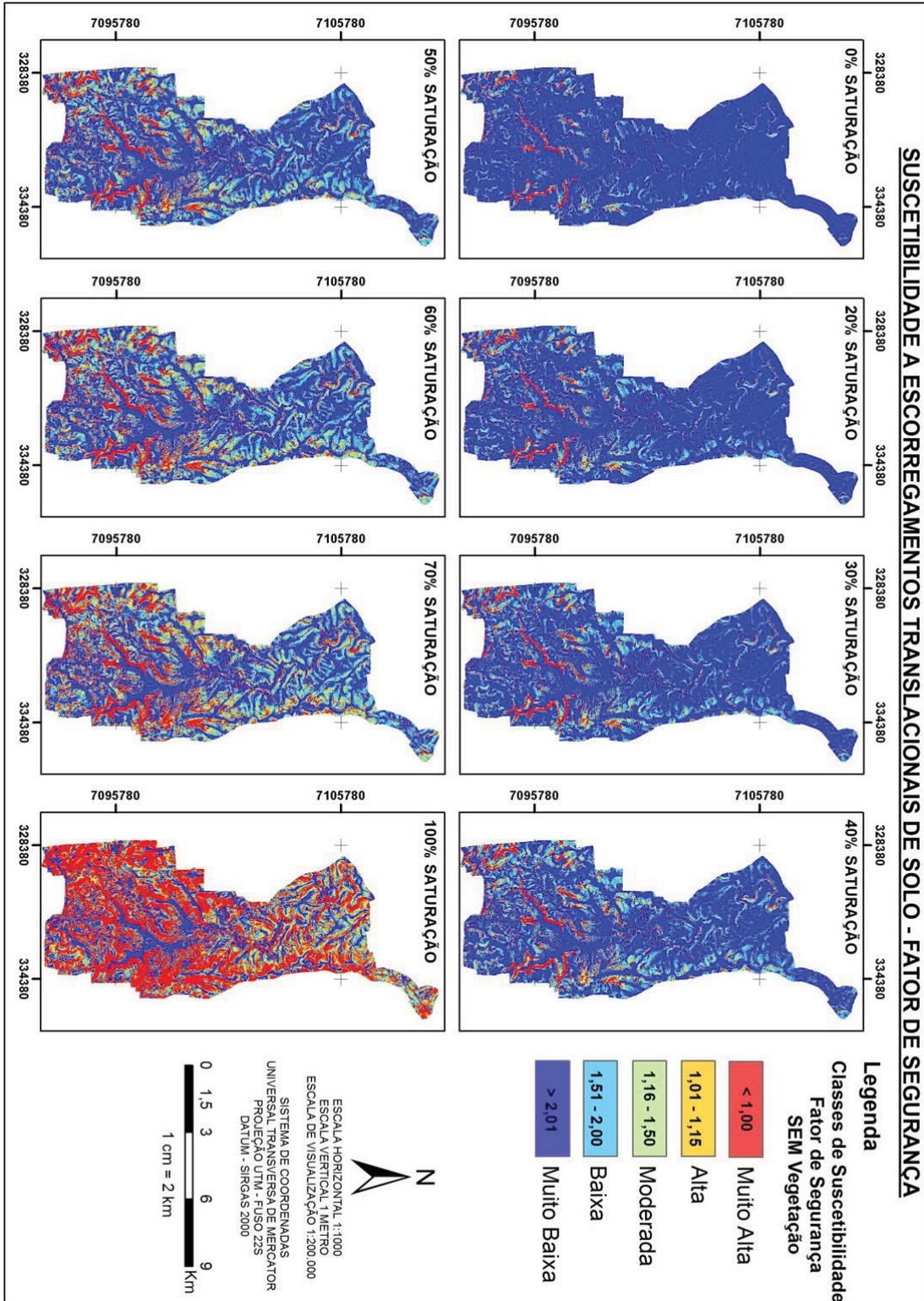
FONTE: A autora (2018)

A análise evolutiva da área face ao aumento do teor de saturação hídrica dos solos evidencia que a água exerce muita influência no perfil de estabilidade de uma encosta, quanto maior a concentração de água no solo, maior é a suscetibilidade dessa encosta a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa independente da presença de vegetação (Figura 8.20).

Quando dispostos lado a lado, os cenários evolutivos permitem uma análise comparativa das respostas do modelo. Embora a estabilidade de toda a área de

estudo reduza gradativamente com o acréscimo de água no perfil de solo, a alteração é mais perceptível na região sul, que detêm as porções mais declivosas.

FIGURA 8.20 – EVOLUÇÃO DA ÁREA FACE AO AUMENTO CONSECUTIVO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO



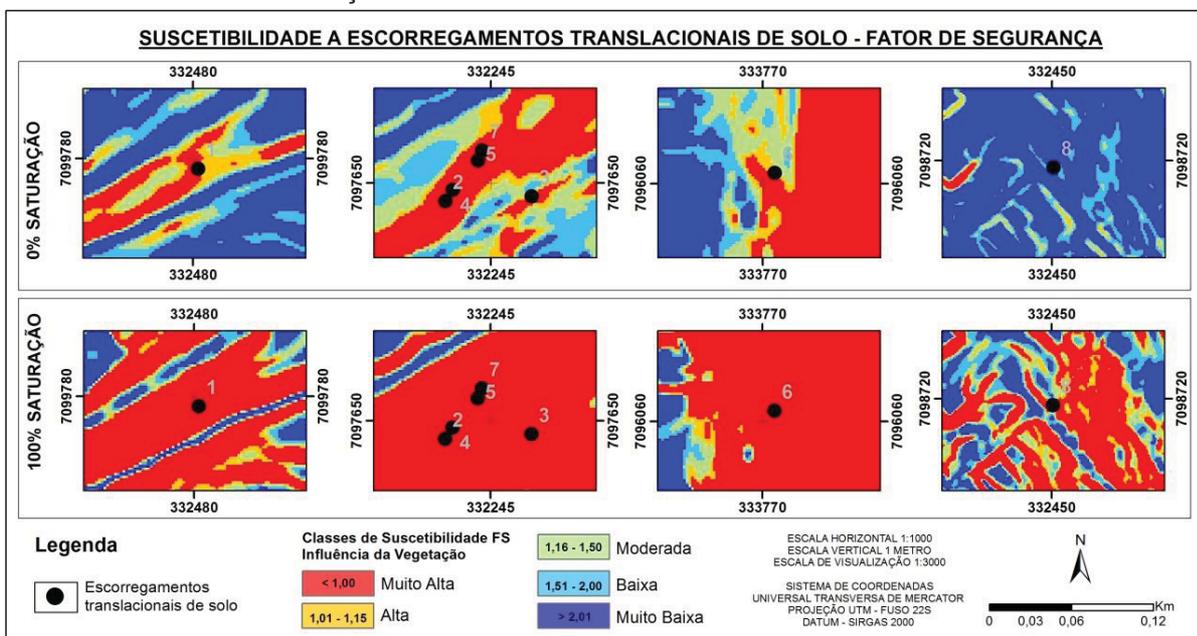
FONTE: A autora (2018)

A modelagem do Fator de Segurança representa a realidade do terreno como resposta direta dos parâmetros inseridos na equação. Embora a representação da área num cenário de solo 70% saturado seja alarmante pela abrangência de áreas instáveis, é importante ressaltar que os atributos topográficos são considerados como um todo e não de forma isolada. Portanto, certas características do terreno podem se sobressair ao modelo como é o caso da declividade.

Áreas com declividade elevadas são consideradas naturalmente instáveis. Ainda que num cenário hipotético onde a saturação hídrica é 0% ou seja, vertente 100% seca, o modelo de FS identifica áreas de “muita alta suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo” (Figura 8.21). Por essa razão, regiões declivosas têm sua instabilidade ou suscetibilidade atribuída por mais de um método.

A figura 8.21 evidencia ainda o cenário de saturação extrema, com o perfil de solo 100% preenchido por água. Nesse cenário hipotético até mesmo regiões de declividade inferior a 5° estariam altamente suscetíveis à deflagração de ETS.

FIGURA 8.21 – SOBREPOSIÇÃO DE CICATRIZES DE ETS AOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS



FONTE: A autora (2018)

As encostas com inclinação superior a 20° em segmentos de vertentes intermediárias a superiores, cujo valor altimétrico supera 800 metros, foram consideradas as porções mais instáveis ou áreas de muito alta suscetibilidade a

ETS. A morfologia dessas encostas está relacionada as rochas mais resistentes da Formação Candói, Membro Chopinzinho (Figura 8.2). Segundo a descrição litológica de Licht *et al.*, (2012), o membro Chopinzinho contém brechas hidrotermais entre os derrames de basaltos, litotipo comumente associado a movimentos de massa no Grupo Serra Geral, e disjunções colunares, estruturas verticais tabulares de resfriamento rápido que formam fendas na rocha, caminhos preferenciais de infiltração de água.

Licht *et al.*, (2012) afirmam que as camadas de brechas hidrotermais e tufo presentes na Formação Candói, mais precisamente no Membro Chopinzinho, marcam as vertentes com fortes e agudas quebras na topografia devido a alta resistência ao intemperismo que esses litotipos apresentam se comparados com os derrames de basalto e basalto-andesítico.

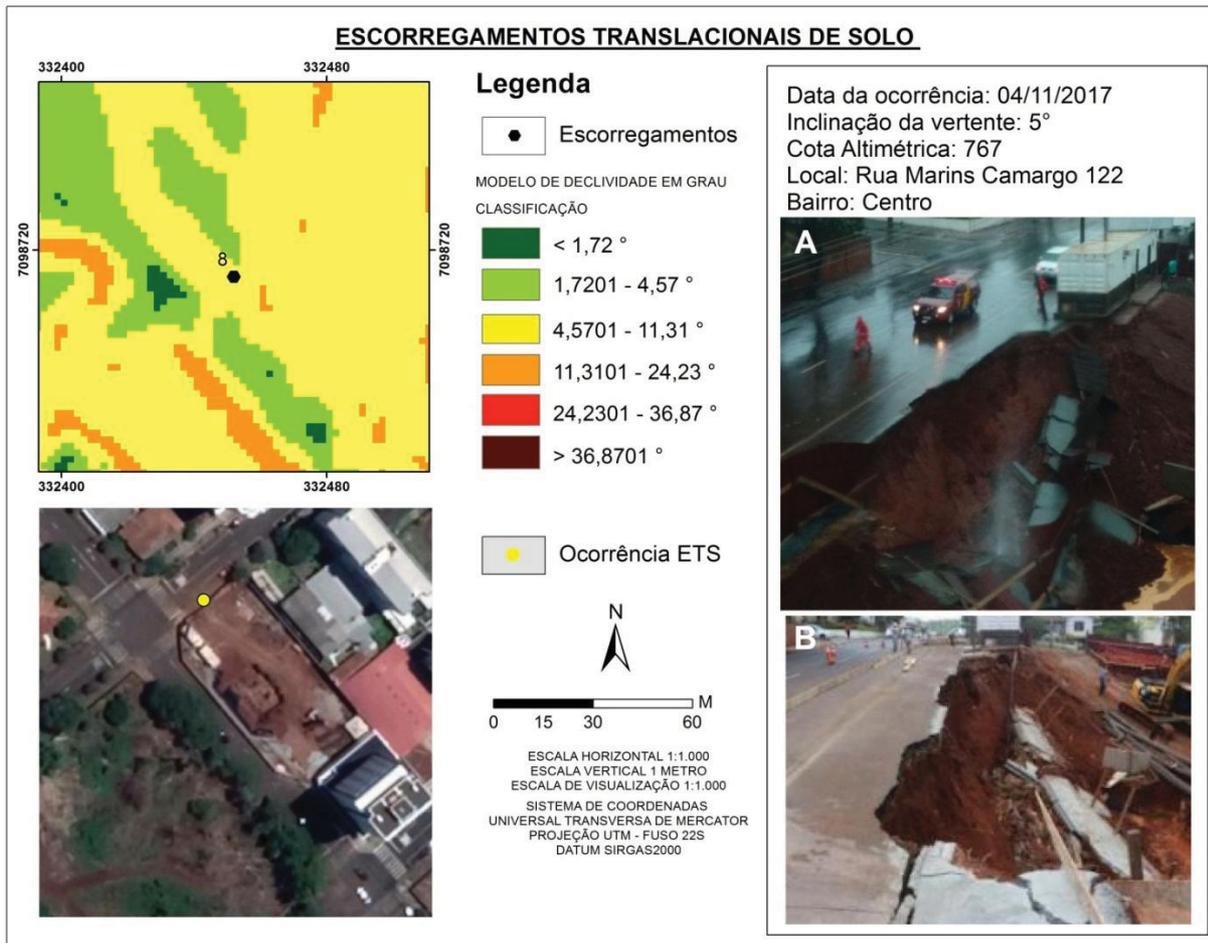
Outro ponto de destaque é que as áreas com declividade inferior a 6° apresentaram baixa ou muito baixa suscetibilidade a escorregamentos de solo mesmo em teores elevados de saturação dos solos.

O acidente de 04/11/2017 ocorreu em uma área de declividade igual a 5° considerada estável, atingindo a classificação de suscetível somente em solo 100% saturado (Figura 8.21).

Ocorre que a base planialtimétrica utilizada na confecção dos modelos digitais de terreno e declividade é composta por dados aferidos em 2016 condiz, portanto, com a real estabilidade da área até esta data. Ambientes urbanizados estão sujeitos a modificações localizadas de relevo. O escorregamento de solo de 04/11/2017 denota de forte interferência antrópica visto que em 2017 o terreno onde o talude rompeu foi profundamente escavado para a execução de uma obra arquitetônica (Figura 8.22).

As imagens da cicatriz evidenciam um corte retilíneo localizado em um canteiro de obras com inclinação estimada compatível a classificação da EMBRAPA (2006) de relevo montanhoso, não sendo possível definir a declividade no ponto de ruptura. A modificação antrópica do terreno associada a sequencia de sete dias de chuva culminaram no escorregamento de 04/11/2017.

FIGURA 8.22 - LOCALIZAÇÃO E DADOS DO ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL DE SOLO DE 04/11/2017



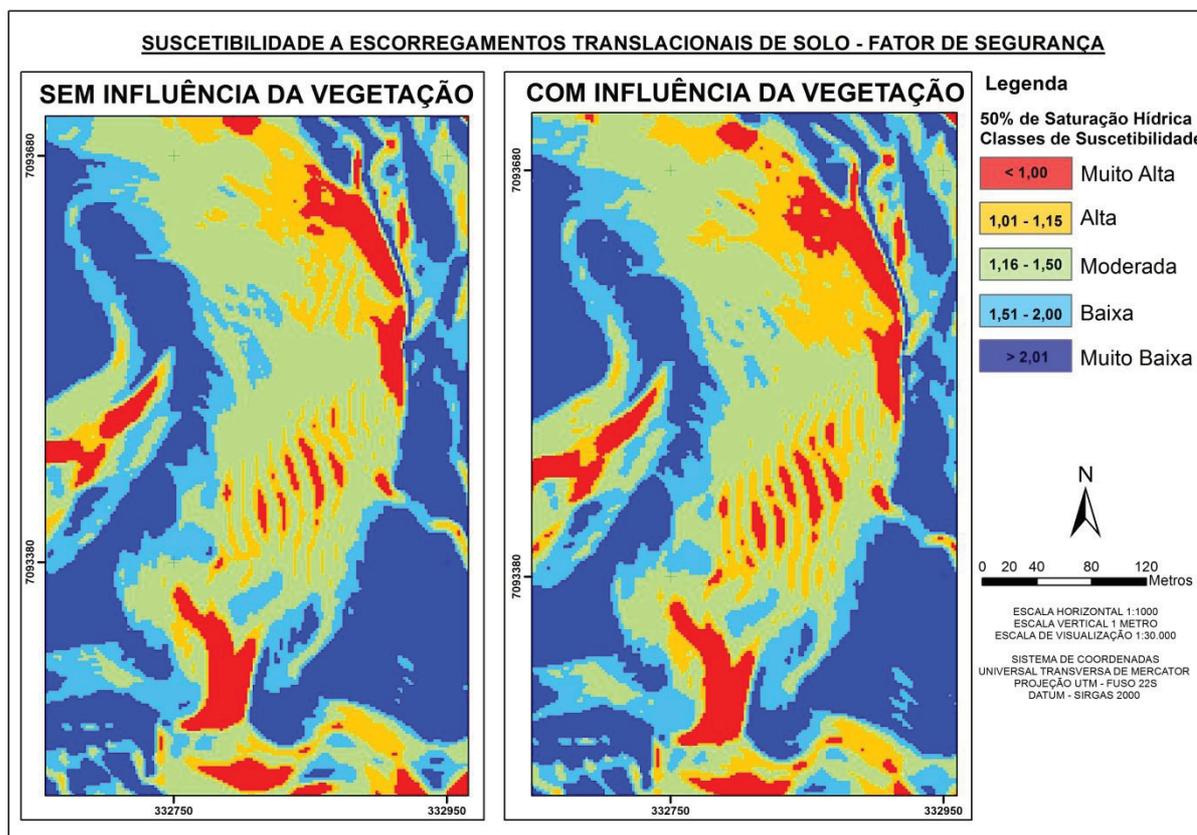
FONTE: Imagem de satélite GOOGLE DIGITALIGLOBE (2018). Modificado de Jornal Diário do Sudoeste (2018)

A presença de vegetação indicou diferenças sucintas em todos os cenários contemplados, sendo mais evidentes nas áreas de relevo ondulado à forte ondulado. (Figura 8.23).

A explicação de tal constatação é bastante simplista. O fator de segurança é um modelo matemático que baliza a razão entre forças resistentes e solicitantes à deflagração de movimentos de massa. Entende-se que se as forças solicitantes forem maiores que as resistentes a ruptura será iminente. Quando considerada a influência da vegetação no sistema parte das forças atuantes são solicitantes, é o caso das pressões exercidas pela força dos ventos sobre a copa das árvores (σ_{ve}), e pelo peso da vegetação sobre a encosta (σ_a). Já a força exercida pelo atirantamento das raízes no solo (S_r) é tida como resistente ao movimento, normalmente superior as demais forças somadas. Essa compensação de forças tende a fornecer a

encostas vegetadas estabilidade superior àquelas onde a vegetação foi removida, (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

FIGURA 8.23 – INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO MODELO PREDITIVO DE FS



FONTE: A autora (2018)

Porém, na análise de eventos reais em que são conhecidos os pontos de ruptura e estes ocorreram abaixo da zona de raízes, a influência das raízes deve ser anulada ou desprezada. Segundo Tabalipa (2008) os eventos registrados em Pato Branco que tiveram suas cicatrizes delimitadas ocorreram abaixo da zona de raízes, de tal forma que na representação da superfície via modelo de Fator de Segurança a força de atirantamento das raízes foi considerada nula. Dessa maneira, quando considerada a influência da vegetação o somatório das forças (σ_a e σ_{ve}), acrescentou peso a estrutura do solo facilitando o deslocamento do material e fazendo com que o modelo respondesse de forma menos estável.

Os valores de FS foram aferidos nos pontos de ruptura nos 8 cenários propostos, com e sem a influência da vegetação. De maneira geral, exceto nas encostas com declividade superior a 30° e saturação inferior a 50%, quando

considerada a influência da vegetação no modelo a área teve sua estabilidade reduzida (Tabela 25).

A tabela 25 apresenta os escorregamentos numerados de acordo com a ordem cronológica de ocorrência e indica a inclinação da vertente no ponto de ruptura. Os dados de FS estão dispostos de forma crescente de saturação do solo com e sem a influência da vegetação.

TABELA 25 - FATOR DE SEGURANÇA AFERIDO NOS PONTOS DE RUPTURA

SAT.	VEG.	ETS CATALOGADOS (inclinação da vertente)							
		1 (20°)	2 (36°)	3 (23°)	4 (39°)	5 (34°)	6 (19°)	7 (28°)	8 (5°)
0%	Com	0,96	0,46	0,89	0,39	0,48	1,03	0,62	3,6
	Sem	0,98	0,17	0,92	0,39	0,48	1,06	0,24	3,9
30%	Com	0,78	0,37	0,72	0,31	0,38	0,83	0,5	2,92
	Sem	0,78	0,26	0,73	0,31	0,38	0,84	0,35	3,14
40%	Com	0,71	0,34	0,66	0,28	0,35	0,77	0,46	2,7
	Sem	0,72	0,28	0,67	0,28	0,35	0,78	0,38	2,89
50%	Com	0,65	0,31	0,61	0,26	0,32	0,7	0,42	2,47
	Sem	0,66	0,31	0,62	0,26	0,32	0,71	0,42	2,66
60%	Com	0,59	0,28	0,55	0,23	0,28	0,63	0,38	2,25
	Sem	0,6	0,28	0,56	0,23	0,29	0,65	0,38	2,43
70%	Com	0,53	0,25	0,49	0,2	0,25	0,57	0,34	2,02
	Sem	0,55	0,25	0,51	0,21	0,26	0,59	0,35	2,21
100%	Com	0,34	0,16	0,32	0,13	0,17	0,37	0,22	1,35
	Sem	0,39	0,17	0,36	0,14	0,18	0,41	0,24	1,58

FONTE: A autora (2018)

8.3.2 Análises dos Índices Pluviométricos Críticos

8.3.2.1 Chuva Crítica (Qc)

A metodologia proposta por Dietrich e Montgomery (1998) foi empregada na definição do índice pluviométrico crítico. Esse método parte dos parâmetros geotécnicos do solo e considera a força de ancoramento das raízes independente do ângulo existente entre estas e o plano de ruptura.

Embora esse método não resulte em dados numéricos de fator de segurança, a exibição da intensidade das chuvas necessárias para deflagração de

movimentos de massa naturais permite inferir que, se considerada a força de ancoramento de raízes (Sr) as encostas vegetadas são consideravelmente mais estáveis do que encostas onde a vegetação é nula ou inexistente (Tabela 26).

Por outro lado, a análise via Qc não estabelece índices de intensidade de chuva (i), vazão crítica (Qc) e tempo de retorno (Tr) para encostas naturalmente instáveis. A resposta do modelo aos parâmetros geotécnicos e topográficos da área indica que encostas não vegetadas com declividade superior a 31° e vegetadas com declividade superior a 39° são áreas naturalmente instáveis.

A tabela 26 apresenta os Índices naturais críticos para as encostas em que ocorreram movimentos de massa com e sem a influência da vegetação, segundo a metodologia de Dietrich e Montgomery (1998). Os valores medidos representam a resposta do modelo para um Fator de Segurança igual a 1,00, limite de ruptura.

TABELA 26 - INTENSIDADE CRÍTICA PARA DIETRICH E MONTEGOMERY (1998) QUANDO FS = 1,00

ETS	Pico (mm/h)	t (min)	i Medida (mm/h)	i* Natural (mm/h)	i Natural (mm/h)	QC* (m/dia)	QC (m/dia)	Tr* (anos)	Tr (anos)
1	65,2/12h	720	5,43	11,808	5,182	0,283	0,124	37,116	0,165
2	64,8/15h	900	4,32	5,710	-	0,137	-	0,902	-
2	61/14h	840	4,35	5,710	-	0,137	-	0,649	-
3	70,2/4h	240	17,55	11,789	4,460	0,283	0,107	0,208	0,001
4	49,4/13h	780	3,8	4,799	-	0,115	-	0,145	-
5	102,2/24h	1440	4,25	7,328	-	0,176	-	43,988	-
	130,6/28h	1680	4,66					92,020	
6	50,6/7h	420	7,22	11,707	5,330	0,281	0,128	2,730	0,015
7	63,6/6h	360	10,6	10,648	2,298	0,256	0,055	0,708	0,000
8	34,35/3h	180	11,58	4,860	2,860	0,117	0,069	0,000	0,000

FONTE: A autora (2018)

LEGENDA: Os indicadores seguidos de (*) são referentes aos dados que consideram a presença de vegetação.

Na Tabela 26 encontram-se os picos de chuva medidos em cada um dos eventos de escorregamento, incluindo os dois dias possíveis de ocorrência do acidente de setembro de 2013. Os picos identificados configuram os cenários mais drásticos de intensidade das chuvas para as datas. Optou-se pela utilização do cenário mais extremo, pois mesmo que a ruptura tenha ocorrido em picos de menor intensidade, os índices críticos medidos não ultrapassariam os estipulados pelo pico máximo.

O valor da intensidade de precipitação naturalmente crítica (i) estipulada por essa análise indica que qualquer evento pluviométrico que supere esse índice tem potencial para desencadear movimentos de massa nessas encostas. Se comparados os valores das intensidades de chuva medidos no ápice de cada evento (coluna i medida) com as intensidades críticas para as respectivas encostas (colunas i^* e i) nota-se que apenas o 3º evento de 02/12/2013 teve a intensidade medida superior à intensidade crítica natural da encosta na presença de vegetação, e que o evento de número 7 de 10/12/2015 equiparou as intensidades medida e natural.

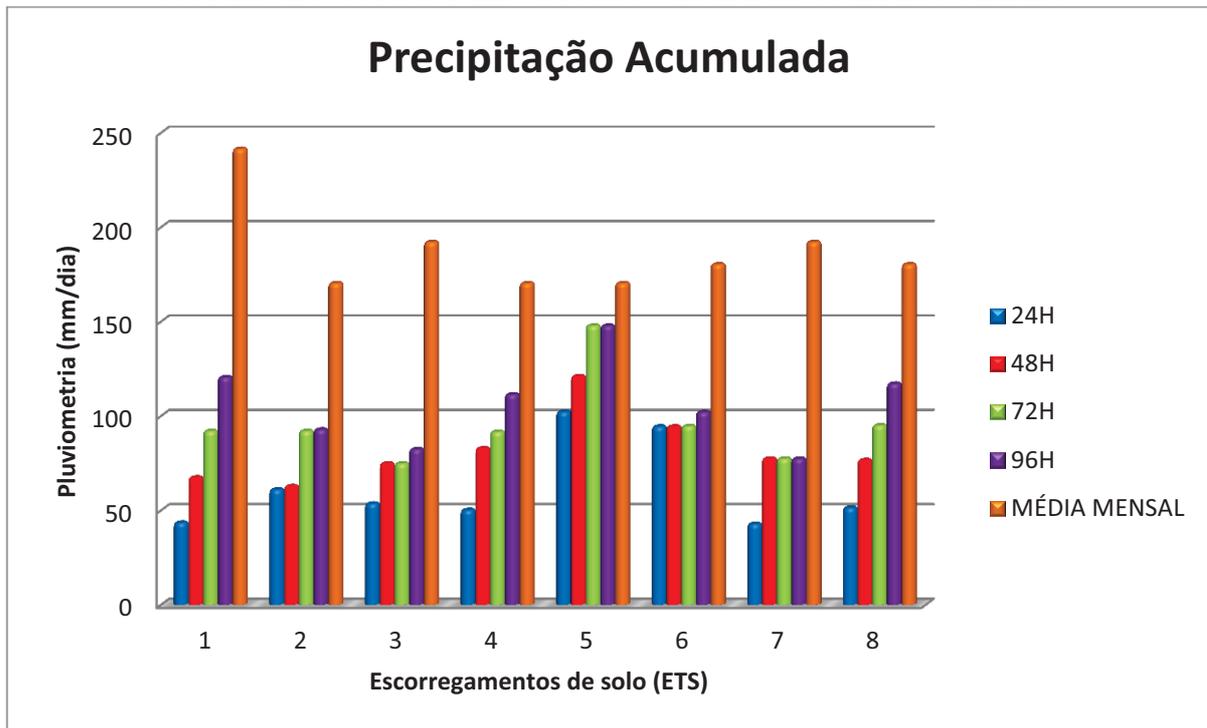
Isso não indica que os escorregamentos que tiveram a intensidade medida inferior aos índices críticos tenham ocorrido por causas não naturais, e sim que o pico máximo aferido nos eventos não teria poder por si só de causar os movimentos de massa. O ETS de 17/10/2000, por exemplo, ocorreu após sete dias de chuvas concentradas numa encosta não vegetada, portanto, o acumulado hídrico no perfil de solo é provavelmente o agente deflagrador da ruptura, mesmo que o pico do evento tenha superado o índice crítico se desconsiderada a vegetação.

O tempo de retorno (Tr) é entendido como prazo estimado em anos para que um evento de mesma intensidade e tempo semelhante de precipitação ininterrupta volte a acontecer. Se Tr for superior a um ano o evento é tido como anômalo ou crítico. De todos os picos de chuva considerados quatro são considerados eventos de chuva crítica, sendo os eventos de 10/12/2015 os mais expressivos totalizando no pico mais brando, mais de 40 anos de recorrência.

Quanto aos escorregamentos de Pato Branco e a relação destes com chuvas intensas, é possível afirmar que nenhum dos ETS foi deflagrado por evento pluviométrico extremo, ou seja, episódio de chuva que supere a média prevista para o mês. A Figura 8.24 demonstra que o somatório dos teores das chuvas isoladas (24h) ou acumuladas nas 96 horas antecedentes as rupturas não atingiu as médias mensais.

Corroborando com a figura 8.24 a e a Tabela 27. Esta destaca ainda a média de chuvas esperada para cada mês, realçando que nenhum dos episódios de chuva atingiu o nível de evento pluviométrico extremo.

FIGURA 8.24 - GRÁFICO DE CHUVA ACUMULADA POR EVENTO DE ETS



FONTE: Adaptada de SIMEPAR (2018)

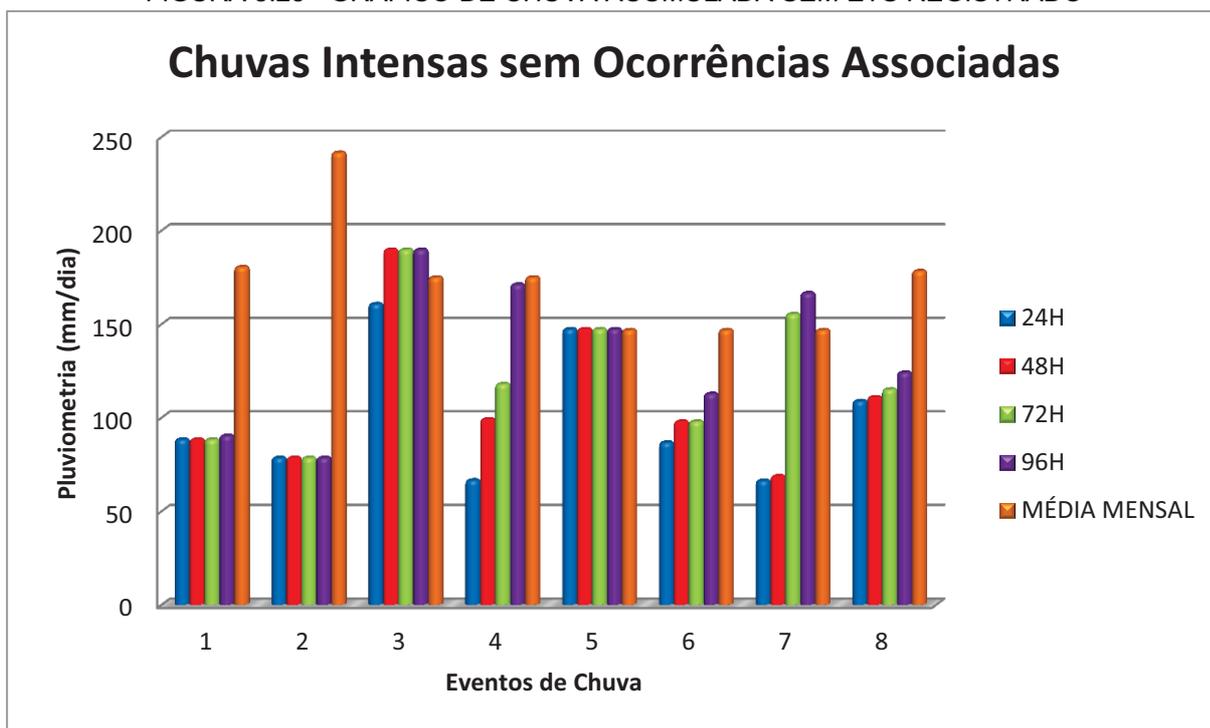
TABELA 27 – PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM ATÉ 96 HORAS

Dia	ETS	24h	48h	72h	96h	Média Mensal
17/10/2000	1	43,5	67,4	92	120,5	241,5
22/09/2013	2	61	62,8	92	92,8	170,3
02/12/2013	3	53,6	74,8	74,8	82,4	192,1
08/06/2014	4	50,2	82,8	91,6	111,4	170,3
27/06/2014	5	102,2	121,1	147,83	147,83	170,3
07/11/2014	6	94,4	94,4	94,6	102	180,3
10/12/2015	7	42,8	77,4	77,4	77,4	192,1
04/11/2017	8	51,4	76,6	95	117,1	180,3

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

Porém, quando considerados os eventos pluviométricos intensos sem verificação de movimento de massa, nota-se que dos oito eventos citados três são classificados como extremos e o evento de 11/03/2011 superou a média prevista para o mês em um único dia (Figura 8.25 e Tabela 28).

FIGURA 8.25 - GRÁFICO DE CHUVA ACUMULADA SEM ETS REGISTRADO



FONTE: Adaptada de SIMEPAR (2018)

TABELA 28 – PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM ATÉ 96 HORAS SEM ETS REGISTRADO

Dia	Ev. Chuva	24H	48H	72H	96H	Média Mensal
14/11/2007	1	88,2	88,2	88,2	90,2	180,3
12/10/2009	2	78,4	78,4	78,4	78,4	241,5
22/04/2010	3	160,6	189,6	189,6	189,6	174,8
26/04/2010	4	66,4	99	117,8	171	174,8
11/03/2011	5	147,2	147,2	147,2	147,2	146,7
28/03/2011	6	86,6	97,8	97,8	112,6	146,7
30/03/2011	7	66,2	68,6	155,2	166,4	146,7
27/02/2016	8	108,8	110,8	115	124	178,2

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

LEGENDA: Destacados os eventos extremos.

As 96h de acumulo de chuva em 26/04/2010 embora classificada como episódio intenso e não extremo, o teor medido ao longo do evento se aproximou da media mensal.

As chuvas de março de 2011 foram atípicas em todo o estado do Paraná. No dia 11/03/2011 ocorreram os picos de chuva mais acentuados do evento

pluviométrico que se estendeu por 4 dias, nesta data uma série de deslizamentos de solo e rocha, corridas de lama e detritos e inundações foram registradas em diversos pontos no estado. Na Serra do Mar Paranaense, mais precisamente no vale do Jacaréi o cenário classificado como catastrófico causou sérios danos estruturais a comunidade de Floresta, pela destruição total ou parcial de casas, ruas, estradas, pontes, lavouras e onde houve um óbito (SILVEIRA *et al.*, 2012). Em Pato Branco embora não se tenha conhecimento de movimentos de massa, a média mensal foi superada em um único dia com um pico de 92mm de chuva em 2 horas.

8.3.2.2 Precipitação X Pluviosidade Anual Média (PAM)

A comparação dos eventos de chuva com a pluviosidade anual média (PAM) seguiu a metodologia proposta por Guidicini e Iwasa (1976) que considera os dados de chuva acumulados em até sete dias (168 horas). As análises consideraram o valor da PAM estimado por Tabalipa (2008) de 2.109,79 mm/ano, e identificaram os coeficientes CC - Coeficiente de ciclo ou histórico da pluviosidade; CE - Coeficiente de episódio; e CF - Coeficiente final, para os episódios de chuva com e sem registros de movimentos de massa nas Tabelas 29 e 30 respectivamente.

TABELA 29 – COEFICIENTES DE PERICULOSIDADE DE CHUVAS

Dia	AC. 168h	CC (%)	CE (%)	CF (%)
17/10/2000	184,9	6,70	2,06	8,76
16/09/2013	66,2	0,02	3,12	3,14
22/09/2013	168,8	5,11	2,89	8,00
02/12/2013	82,4	1,37	2,54	3,91
08/06/2014	111,8	2,92	2,38	5,30
27/06/2014	147,83	2,16	4,84	7,01
07/11/2014	122,8	1,35	4,47	5,82
10/12/2015	99,4	2,68	2,03	4,71
04/11/2017	204	7,23	2,44	9,67

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018)

Guidicini e Iwasa (1976) consideram que se a pluviometria total do evento exceder 12% do PAM, escorregamentos ocorrem independentemente das condições

pluviométricas antecedentes ao evento, porém se a pluviometria total do evento estiver entre 8 e 12% da PAM, escorregamentos ocorrem dependendo do histórico pluviométrico e se a pluviometria total do evento for inferior a 8% da PAM, não é provável a deflagração de escorregamentos.

Nesse contexto apenas três dos oito levantamentos seriam possíveis se considerado o histórico pluviométrico local. Os outros cinco eventos estariam concentrados na classificação de mínima periculosidade onde CF é inferior a 8% da pluviosidade anual média e, portanto, escorregamentos seriam improváveis.

Por outro lado a análise dos eventos de chuva sem incidência de ETS resultou em quatro eventos com CF entre 8 e 12% da PAM e um evento que superou consideravelmente os 12% onde, segundo o método, escorregamentos ocorrem independentemente das condições pluviométricas antecedentes ao evento.

TABELA 30 – COEFICIENTES DE PERICULOSIDADE DE CHUVAS SEM REGISTRO DE ETS

Dia	AC. 168h	Média Mensal	CC	CE	CF
14/11/2007	150,4	180,3	2,95	4,18	7,13
12/10/2009	101,4	241,5	1,09	3,72	4,81
22/04/2010	189,6	174,8	1,37	7,61	8,99
26/04/2010	360,6		13,94	3,15	17,09
11/03/2011	170,8		1,17	6,93	8,10
28/03/2011	112,8	146,7	1,24	4,10	5,35
30/03/2011	181,4		5,46	3,14	8,60
27/02/2016	182,2	178,2	3,48	5,16	8,64

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018) e IAPAR (2018)

A tabela 30 revela ainda que se considerados os acumulados hídricos de 168 horas antecedentes aos eventos intensos cinco deles seriam considerados eventos extremos superando a média mensal.

Vale destacar que embora a comparação com a pluviosidade anual média indique que os eventos não se enquadram na classificação máxima de periculosidade, segundo esse método, se considerada a precipitação total acumulada nos meses em que os escorregamentos foram registrados em comparação as médias previstas para cada mês, em 100% dos casos os valores medidos superaram as médias em ao menos 21%, sendo três eventos com verificação superior a 50% do previsto para o período (Tabela 31).

TABELA 31 - PRECIPITAÇÃO SOBRESALENTE POR PERÍODO

Mês/Ano	Média Mensal Histórica	Precipitação Mensal Aferida	Chuva Sobressalente (mm)	Chuva Sobressalente (%)
out/00	241,5	291,1	49,6	20,54
set/13	170,3	247,4	77,1	45,27
dez/13	192,1	255,2	63,1	32,85
jun/14	170,3	336,13	165,83	97,38
nov/14	180,3	234,2	53,9	29,89
dez/15	192,1	436,6	244,5	127,28
nov/17	180,3	270,69	90,39	50,13

FONTE: Adaptado de SIMEPAR (2018) e IAPAR (2018)

Pato Branco embora apresente todos os condicionantes para a ocorrência de movimentos de massa, detém uma quantidade ínfima de dados desses eventos. A escassez de informações e evidências de escorregamentos propriamente dita, não significa que estes não ocorram, e sim que por diversas razões os eventos não são registrados como deveriam. Dentre os fatos relatados pelas autoridades locais, o baixo índice de registros acontece pela inexistência um órgão municipal responsável por fazê-lo e comunicar a defesa civil do estado da ocorrência, este último ocorre apenas na existência de danos físicos ou financeiros consideráveis ou na averiguação de risco eminente a segurança local. Outra possível causa é o não acionamento das autoridades competentes, pelos moradores, diante de ocorrências de baixa gravidade.

8.3.2.3 Chuva Crítica e Tempo de Recorrência (Tr)

O último método empregado nessa pesquisa é a proposta por Fendrich (2003) que prevê o tempo de recorrência de um evento crítico através da relação das características da chuva, sua intensidade, duração, frequência e distribuição.

Os índices críticos estabelecidos para o município de Pato Branco estão dispostos na Tabela 32. Foram considerados tempo de precipitação de 10 minutos a 96 horas (5760 min) e tempo de recorrência de 1 a 20 anos foram utilizados para definição dos valores de Tr de cada evento contemplado no estudo.

TABELA 32 - INTENSIDADE MÁXIMA DE CHUVA

Tr (anos)	t (minutos)													
	10	20	30	45	60	90	120	180	360	720	1440	2880	4320	5760
01	101,90	74,77	60,19	47,43	39,64	30,44	25,08	18,96	11,62	7,06	4,27	2,58	1,92	1,55
02	113,22	83,08	66,88	52,70	44,05	33,82	27,86	21,07	12,91	7,84	4,74	2,86	2,13	1,73
03	120,41	88,36	71,13	56,05	46,85	35,97	29,63	22,41	13,73	8,34	5,04	3,04	2,26	1,83
04	125,80	92,31	74,31	58,56	48,94	37,58	30,96	23,41	14,34	8,71	5,27	3,18	2,37	1,92
05	130,14	95,49	76,88	60,58	50,63	38,87	32,03	24,21	14,84	9,01	5,45	3,29	2,45	1,98
06	133,79	98,18	79,04	62,28	52,05	39,96	32,93	24,89	15,26	9,27	5,61	3,38	2,52	2,04
07	136,96	100,50	80,91	63,76	53,29	40,91	33,71	25,49	15,62	9,49	5,74	3,46	2,58	2,09
08	139,77	102,56	82,57	65,07	54,38	41,75	34,40	26,01	15,94	9,68	5,86	3,53	2,63	2,13
09	142,30	104,42	84,06	66,24	55,36	42,51	35,02	26,48	16,22	9,86	5,96	3,60	2,68	2,17
10	144,60	106,10	85,42	67,31	56,26	43,19	35,58	26,90	16,49	10,02	6,06	3,66	2,72	2,20
11	146,71	107,65	86,66	68,29	57,08	43,82	36,10	27,30	16,73	10,16	6,15	3,71	2,76	2,24
12	148,66	109,08	87,82	69,20	57,84	44,40	36,58	27,66	16,95	10,30	6,23	3,76	2,80	2,27
13	150,48	110,42	88,89	70,05	58,54	44,95	37,03	28,00	17,16	10,42	6,30	3,80	2,83	2,29
14	152,18	111,67	89,90	70,84	59,21	45,46	37,45	28,32	17,35	10,54	6,38	3,85	2,86	2,32
15	153,79	112,85	90,85	71,59	59,83	45,94	37,85	28,62	17,53	10,65	6,44	3,89	2,89	2,34
16	155,30	113,96	91,74	72,30	60,42	46,39	38,22	28,90	17,71	10,76	6,51	3,93	2,92	2,37
17	156,74	115,01	92,59	72,97	60,98	46,82	38,57	29,16	17,87	10,86	6,57	3,96	2,95	2,39
18	158,11	116,02	93,40	73,60	61,51	47,23	38,91	29,42	18,03	10,95	6,62	4,00	2,97	2,41
19	159,41	116,98	94,17	74,21	62,02	47,62	39,23	29,66	18,18	11,04	6,68	4,03	3,00	2,43
20	160,66	117,89	94,91	74,79	62,51	47,99	39,54	29,89	18,32	11,13	6,73	4,06	3,02	2,45

FONTE: Adaptado de FENDRICH (2003)

LEGENDA: Dados em mm/h.

A análise da intensidade (I) e Tr dos 16 eventos segundo Fendrich (2003) parte do mesmo pressuposto adotado na definição dos índices críticos por Dietrich e Montgomery (1998), de que os picos de máxima intensidade representam o momento de maior criticidade do evento.

Para Fendrich (2003), apenas dois dos oito eventos registrados são considerados críticos, sendo o primeiro 02/12/2013 com Tr previsto de 2 anos e o segundo 27/06/2014 se enquadra como crítico se considerados quaisquer um dos 3 picos de chuva medidos no episódio, com o Tr mais longo de 3,7 anos, ambos destacados na Tabela 33.

TABELA 33 - INDICE CRITICO (I) PARA AS DATAS COM OCORRENCIAS DE ETS

Dia	Pico (mm/h)	Índice Crítico	Tr (anos)
17/10/2000	65,2/12h	5,43	0,16
16/09/2013	64,8/15h	4,32	0,62
22/09/2013	61/14h	4,35	0,62
02/12/2013	70,2/4h	17,55	2,3
08/06/2014	49,4/13h	3,8	0,05*
	147,83/72h	2,05	1,7
27/06/2014	102,23/24h	4,25	1,0
	130,6/28h	4,66	3,7
07/11/2014	50,6/7h	7,22	0,075*
10/12/2015	63,6/6h	10,6	0,5
04/11/2017	34,35/3h	11,58	0,7

FONTE: Adaptado de FENDRICH (2003) e SIMEPAR (2018)

LEGENDA: * Índice cuja recorrência é inferior a um mês.

Quando analisadas as datas com episódios de chuvas intensas sem evidências de escorregamentos, seis dos oitos eventos foram classificados como eventos de chuva crítica, sendo três deles com previsão de recorrência superior a 20 anos (Tabela 34).

TABELA 34 - INDICE CRITICO (I) PARA AS DATAS SEM REGISTRO DE ETS

Dia	Pico (mm/h)	Índice crítico	Tr (anos)
14/11/2007	85,2/10H	8,52	1,5
12/10/2009	78,4/9H	8,71	1,1
22/04/2010	129,0/10H	12,9	22,1
26/04/2010	32,5/1H	32,5	0,25
11/03/2011	91,2/2H	45,6	50,7
28/03/2011	47,6/2H	23,8	0,75
30/03/2011	55,4/2H	27,7	2,0
27/02/2016	97,8/4H	24,45	20,1

FONTE: Adaptado de FENDRICH (2003) e SIMEPAR (2018)

Dos eventos catalogados como críticos três se destacam pelo tempo previsto de retorno superior a 20 anos, sendo um deles esperado a cada meio século. As chuvas de março de 2011 conforme citado anteriormente resultaram em dezenas de movimentos de massa no estado do Paraná.

A comparação entre os três métodos abordados na investigação de chuvas críticas apontou que a definição da criticidade do um evento está diretamente relacionada com as características consideradas pela análise. Nesse caso quando consideradas somente as características da chuva em detrimento dos parâmetros da vertente, os eventos se mostraram mais brandos e com Tr preferencialmente mais curtos (Tabela 35).

Vale destacar que o método de Guidicini e Iwasa (1976) não indica a criticidade do evento, o coeficiente CF aborda a periculosidade da chuva. A tabela 35 destaca ainda que 3 dos eventos de chuva relacionados aos ETS registrados, foram intensos o suficiente para deflagração de movimentos de massa em ao menos uma metodologia.

TABELA 35 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO CRITICA E ESCORREGAMENTOS DE SOLO

Escorregamento Translacional de Solo		Dietrich e Montegomery (1998)	Guidicini e Iwasa (1976)	Fendrich (2003)
1	17/10/2000	TR = 37,116	CF = 8,760	0,160
2	16/09/2013	0,902	3,140	0,620
	22/09/2013	0,649	CF = 8,000	0,620
3	02/12/2013	0,208	3,910	TR = 2,00
4	08/06/2014	0,145	5,300	0,050
5	27/06/2014	TR = 43,988	7,010	TR = 2,00
6	07/11/2014	TR = 2,730	5,820	0,075
7	10/12/2015	0,708	4,710	0,500
8	04/11/2017	0,000	CF = 9,670	0,700

FONTE: Adaptado de FENDRICH (2003) e SIMEPAR (2018)

Se considerado ao menos um dos métodos, 5 dos 8 eventos de escorregamento foram deflagrados por episódios de chuva crítica. Vale ressaltar que os eventos de 17/10/2000 e 27/06/2014 foram considerados críticos por 2 métodos. De acordo com Guidicini e Iwasa (1976), os eventos 17/10/2000, 22/09/2013 e 04/11/2017 foram deflagrados por episódios de chuvas intensas e/ou extensas porem sem indicação de anomalia sazonal.

8. CONCLUSÕES

A pesquisa contemplou os escorregamentos translacionais de solo ocorridos entre os anos de 1998 e 2018 no município de Pato Branco. Foram catalogados apenas 8 escorregamentos de solo em ambiente urbano no período de interesse da pesquisa, embora fotografias, imagens de satélite e relatos locais indiquem que o número de eventos é consideravelmente superior ao confirmado.

A ausência de um órgão local responsável pelo registro de ocorrências de eventos naturais dificultou a obtenção de dados precisos da representatividade dos movimentos de massa na área e da fragilidade do ambiente urbano para tais eventos.

Outra dificuldade encontrada em relação ao levantamento dos dados se deve a coleta em diferentes fontes de pesquisa, a fim de garantir que o número de eventos locais representasse a importância do estudo para o município. Cada fonte possui padronização específica de registro, por essa razão os dados referentes aos eventos não apresentam a mesma precisão detalhista, ao ponto de termos eventos sem exatidão de data e subsequente índice pluviométrico desencadeador definidos.

As cicatrizes catalogadas estão dispersas na área de estudo e concentradas preferencialmente em encostas declivosas com relevo montanhoso a escarpado (EMBRAPA, 2006). Dos oito eventos levantados cinco ocorreram em uma vertente íngreme cuja inclinação varia de 22 a 39° e base densamente povoada.

A modelagem do Fator de Segurança empregada na análise da estabilidade das vertentes resultou em índices discretizados em 5 classes de suscetibilidade. A classe que compreende valores de $FS < 1,00$ representa as áreas de muito alta suscetibilidade a escorregamentos de solo, áreas cujo $1,00 < FS < 1,15$ foram classificadas como altamente suscetíveis a ETS, $1,15 < FS < 1,5$ moderadamente suscetíveis, entre $1,5 < FS < 2,0$ com baixa suscetibilidade e por fim as áreas cujo $FS > 2,0$ foram classificadas como de muito baixa suscetibilidade a ETS.

Para a confecção dos mapas de FS foram utilizados dados geotécnicos dos solos e aspectos físicos da área, dentre eles a declividade, a influência da presença de vegetação e o teor de água no perfil de solo, sendo este variável de 0% a 100%.

Os mapas gerados na modelagem do fator de segurança para análise da estabilidade das vertentes na área urbana de Pato Branco, apoiados no uso de SIG,

demonstraram potencial na identificação e mapeamento de áreas susceptíveis a deslizamentos nos mais distintos cenários de saturação hídrica. Contudo a versatilidade do ambiente urbanizado quanto a alterações antrópicas indica que uma abordagem como essa gera mapas provisórios que carecem de atualização de dados planialtimétricos conforme a demanda de crescimento municipal.

A análise evolutiva da área face ao aumento do teor de saturação hídrica dos solos demonstrou que a água exerce muita influência no perfil de estabilidade de uma encosta. Exceto em regiões onde a declividade é acentuada, a suscetibilidade da área a ocorrência de ETS se revelou proporcional ao aumento da quantidade de água no solo.

De maneira geral, as regiões mais instáveis ou áreas de muito alta suscetibilidade a ETS foram identificadas na porção sul da área e compreendem encostas com inclinação superior a 20° em segmentos de vertentes intermediárias a superiores, cujo valor altimétrico supera 800 metros. A morfologia dessas encostas está diretamente relacionada a geologia local, principalmente a presença de brechas hidrotermais e a estruturação dos basaltos mais resistentes da Formação Candói.

Regiões planas ou áreas com declividade inferior a 6° apresentaram baixa ou muito baixa suscetibilidade a escorregamentos de solo mesmo em teores elevados de saturação dos solos.

Nas regiões de declividade superior 24° ou 45% o FS se mostrou ineficiente para a determinação da suscetibilidade evolutiva da área, pois generalizou a classificação das encostas como áreas de muito alta suscetibilidade independente do teor hídrico acumulado no perfil de solo. A declividade é um parâmetro de entrada presente na equação como força resistente e solicitante, quando o valor é elevado este parâmetro se sobressai aos demais descaracterizando o peso atribuído a água no sistema.

A resposta do modelo é válida, pois, áreas cuja inclinação ultrapassa os 24° são naturalmente instáveis e consideradas como inapropriadas a habitação. Em topo de morro a partir do limite de declividade de 45% a encosta é classificada como área de preservação permanente (APP).

A sobreposição das cicatrizes catalogadas para validação do modelo previsional, em solo 30% saturado, demonstrou um índice de 87% de compatibilidade com áreas cujo $FS < 1,00$. Esse percentual se manteve até o

penúltimo cenário, sendo modificado a 100% de precisão quando se atingiu 100% da saturação hídrica do solo. O evento de 04/11/2017 é um exemplo da interferência antrópica na deflagração de movimentos de massa, visto que o ETS ocorreu numa área com 5° de inclinação que era tida como estável ainda que considerado um cenário de saturação hídrica de 90%.

O ETS de 04/11/2017 ocorreu num canteiro de obras, num talude antrópico escavado para a execução da fundação de prédio. Ainda que a ocorrência seja relacionada a modificação da topografia da área, o modelo teria alcançado 100% de acurácia caso a base planialtimétrica que tem escala 1:1.000 tivesse sido confeccionada posteriormente ao corte do talude em questão.

Quanto a evolução da predisposição da área a ETS, num cenário de 40% de saturação hídrica, 10,7% da área urbanizada apresenta $FS < 1,00$, e cerca de 4% encontra-se na classe de valores de FS entre 1,00 e 1,15. Segundo a modelagem aproximadamente 15% da área de estudo será altamente suscetível a escorregamentos translacionais de solo quando a saturação do solo atingir 40%.

Já num cenário de 60% de saturação hídrica, 22,4% da área apresenta $FS < 1,00$, e 9,2% tem FS entre 1,00 e 1,15, totalizando 31,6% da área como altamente suscetível a movimento de massa. Num cenário extremista de 100% de saturação do solo 82,6% será classificada como muito alta suscetibilidade a ETS.

A presença de vegetação indicou diferenças sucintas em todos os cenários contemplados, sendo mais evidentes nas áreas de relevo ondulado à forte ondulado. Quando considerada a existência de cobertura vegetal, a área respondeu ao modelo com maior instabilidade, devido ao peso equacional das forças solicitantes que superaram as resistentes. Os esforços solicitantes consideram a pressão exercida pela força dos ventos sobre a copa das árvores (σ_{ve}) e o peso da vegetação sobre a encosta (σ_a), forças que são normalmente neutralizadas e superadas pela força de atirantamento das raízes no solo (S_r) que é tida como resistente ao movimento. Esta última, porém, foi desconsiderada visto que os escorregamentos catalogados ocorreram abaixo da zona de influência das raízes.

Vale ressaltar que a resposta do modelo FS seguiu a metodologia proposta por Fiori e Carmignani (2006) e que quando comparado a metodologia proposta por Dietrich e Montgomery (1998) que considera a força de ancoramento de raízes (S_r) independente da profundidade da ruptura, as encostas vegetadas se mostraram

consideravelmente mais estáveis do que encostas onde a vegetação é nula ou inexistente.

A metodologia de Dietrich e Montgomery (1998) empregada na definição do índice pluviométrico crítico, assim como o FS, considera os parâmetros topográficos das vertentes e geotécnicos do solo. A intensidade da chuva é determinada em função da vazão crítica da água no perfil de solo. O modelo também matemático tem o FS como parâmetro de entrada, ou seja, é necessário estabelecer um valor específico de FS para que se conheça a intensidade das chuvas necessárias para deflagração de movimentos de massa naturais.

Uma fragilidade da metodologia de Dietrich e Montgomery (1998) é que a análise via Q_c não estabelece índices de intensidade de chuva (i), vazão crítica (Q_c) e tempo de retorno (Tr) para encostas naturalmente instáveis. Para esse modelo quando considerado um Fator de Segurança igual a 1,00, limite de ruptura, encostas não vegetadas com declividade superior a 31° e vegetadas com declividade superior a 39° são áreas naturalmente instáveis.

Para Dietrich e Montgomery (1998) apenas dois escorregamentos 02/12/2013 e 10/12/2015 poderiam ocorrer por causas naturais, visto que somente estes atingiram ou superaram a intensidade de chuva necessária para a deflagração de um ETS naturalmente. O modelo considera apenas o pico máximo de chuva aferido em cada evento e não o acumulado hídrico do evento como um todo. O ETS de 17/10/2000, por exemplo, ocorreu após sete dias de chuvas concentradas numa encosta não vegetada, portanto, o acumulado hídrico no perfil de solo é provavelmente o agente deflagrador da ruptura, mesmo que o pico do evento tenha superado o índice crítico se desconsiderada a vegetação.

Quanto ao tempo de retorno (Tr), que quando superior a um ano classifica o evento como anômalo ou crítico, para Dietrich e Montgomery (1998) os eventos de chuva que culminaram nos ETS levantados apresentaram quatro episódios de chuva crítica, sendo 17/10/2000 com Tr de 37,116 anos, 27/06/2014 com 2 eventos expressivos e Tr estimados de 92,020 e 43,988 anos, e por fim 10/12/2015 com Tr de 2,730 anos. Já em relação a chuvas extremas, episódio de chuva que supere a média prevista para o mês, nenhum dos teores de chuva isolados (24h) ou acumulados nas 96 horas antecedentes as rupturas atingiu as médias mensais, logo os escorregamentos não foram deflagrados por eventos pluviométricos extremos.

Porém, quando consideradas as chuvas intensas sem verificação de ETS, os eventos de 22/04/2010, 03/03/2011 e 11/03/2011 foram classificados como extremos. A chuva de 11/03/2011 superou a média prevista para o mês (146,7 mm) em um único dia, com o registro de 147,2 mm de chuva.

A metodologia proposta por Guidicini e Iwasa (1976) foi utilizada na comparação dos eventos de chuva com a pluviosidade anual média (PAM), com dados de chuva acumulados em até sete dias (168 horas) e a PAM de 2.109,79 mm/ano. Foram identificados os CC - Coeficiente de ciclo ou histórico da pluviosidade; CE - Coeficiente de episódio; e CF - Coeficiente final de cada evento de ETS catalogado.

Guidicini e Iwasa (1976) consideram que se a pluviometria total do evento exceder 12% do PAM, escorregamentos ocorrem independentemente das condições pluviométricas antecedentes ao evento, porém se a pluviometria total do evento estiver entre 8 e 12% da PAM, escorregamentos ocorrem dependendo do histórico pluviométrico e se a pluviometria total do evento for inferior a 8% da PAM, não é provável a deflagração de escorregamentos.

Nesse contexto os episódios de chuva registrados em 17/10/2000, 22/09/2003 e 04/11/2017 superaram 8% da PAM e segundo Guidicini e Iwasa (1976), escorregamentos poderiam ocorrer dependendo do histórico pluviométrico local. Os demais eventos foram classificados como de mínima periculosidade onde CF é inferior a 8% da pluviosidade anual média e, portanto, escorregamentos seriam improváveis.

Segundo esse método, nenhum evento se enquadrou na classificação máxima de periculosidade, porém, quando considerada a precipitação total acumulada nos meses em que os escorregamentos foram registrados em comparação as médias previstas para cada mês, em 100% dos casos os valores medidos superaram as médias em ao menos 21%, sendo três eventos com verificação superior a 50% do previsto para o período.

Quando consideradas as chuva sem incidência de ETS, os episódios de 22/04/2010, 11/03/2011, 30/03/2011 e 27/02/2016 apresentaram o CF entre 8 e 12% da PAM e o evento de 26/04/2010 superou consideravelmente os 12% onde, segundo o método, escorregamentos ocorriam independentemente das condições

pluviométricas antecedentes ao evento. Além disso, 5 episódios foram classificados como eventos extremos superando a média mensal.

A metodologia proposta por Fendrich (2003) define o tempo de recorrência de um evento crítico através da relação das características da chuva (intensidade, duração, frequência e distribuição). O autor considera que os picos de máxima intensidade representam o momento de maior criticidade do evento. Foram considerados o tempo de precipitação de 10 minutos a 96 horas (5760 min) e tempo de recorrência de 1 a 20 anos.

Para Fendrich (2003), apenas 2 dos 8 eventos registrados foram considerados críticos, 02/12/2013 com Tr previsto de 2,0 anos e 27/06/2014 que se enquadra como crítico se considerados quaisquer um dos 3 picos de chuva medidos no episódio, com o Tr mais longo de 3,7 anos.

Quando analisadas as datas com episódios de chuvas intensas sem evidências de escorregamentos, 6 dos 8 eventos foram classificados como eventos de chuva crítica, sendo os mais expressivos os episódios de 22/04/2010, com Tr de 22,1 anos; 11/03/2011 com Tr de 50,7 anos e 27/02/2016 com Tr de 20,1 anos.

Ambas as metodologias utilizadas para a predição de eventos críticos e extremos, se mostraram eficientes. Porém, no âmbito dessa pesquisa, a proposta de Dietrich e Montgomery (1998) que integra as características da chuva, com as características físicas da vertente e os parâmetros geotécnicos do solo, apresentou não só a intensidade de chuva crítica para cada vertente, quando a proposta de Fendrich (2003) generaliza a chuva crítica para a área toda, como também permitiu inferir a influência antrópica na deflagração de cada evento. De tal forma que entre os métodos abordados foi o mais significativo.

As divergências quanto às intensidades críticas dos eventos de chuva e tempo de recorrência, verificadas na comparação dos métodos, indicaram que as características físicas da encosta na classificação da criticidade de um evento pluviométrico são tão influentes quanto às das chuvas, e que quando desconsideradas, os eventos de chuva tendem a ser mais brandos.

Em ambiente urbano a deflagração de escorregamentos de solo está relacionada a eventos de chuva crítica com maior ou menor frequência de acordo com o método empregado. Contudo ainda que o universo amostral desse trabalho seja pequeno, foram identificados 5 eventos de chuva crítica relacionados a ETS,

sendo os eventos de 17/10/2000 e 27/06/2014 considerados críticos por duas metodologias.

A análise das chuvas mensais dos meses em que ocorreram ETS demonstraram que ainda que os episódios de chuvas isoladas não de enquadrem na classificação de eventos extremos, estes ocorreram em meses de precipitação atípica, com índices que superaram de 20% a 97% a média prevista para o período. Portanto, todos os escorregamentos registrados em Pato Branco relacionam-se a eventos de pluviosidade sazonal intensa.

A ação antrópica dentre os agentes deflagradores ou intensificadores de movimentos de massa se evidenciou em sete dos oitos eventos locais, sendo quatro deles diretamente relacionados ao corte realizado no sopé de uma encosta para a execução de uma edificação de 3 andares. Vista, portanto, como condicionante de influência na deflagração de escorregamentos de solo em ambiente urbano, principalmente se atrelada a condições topográficas favoráveis a instabilidade de encostas.

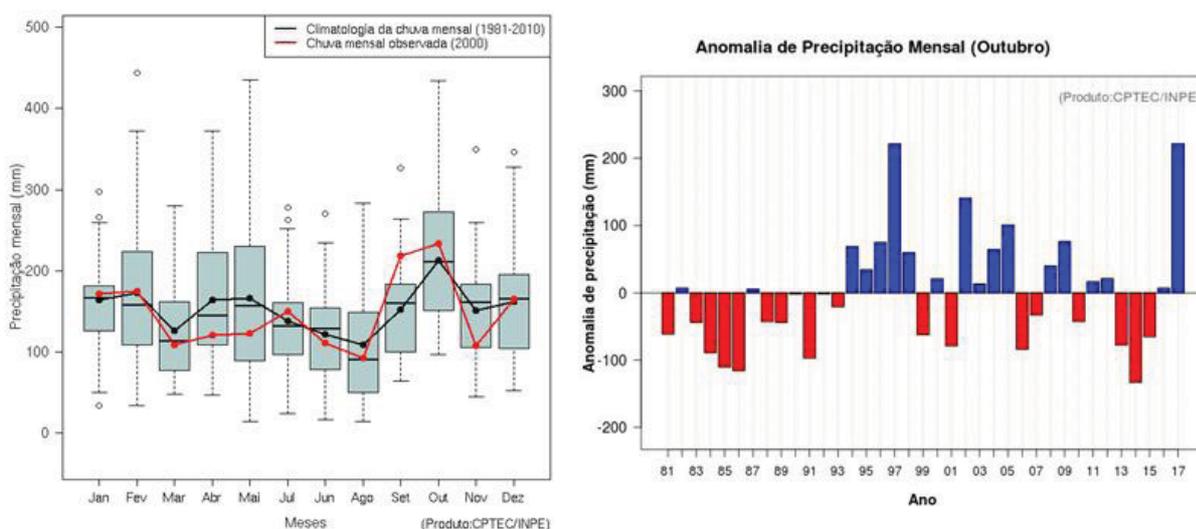
Por fim, as metodologias determinísticas utilizadas na predição de chuvas críticas e as sucessivas análises empíricas de correlação entre escorregamentos locais e eventos pluviométricos críticos realçaram a ideia de que a escassez de registros de movimentos de massa em Pato Branco se deve a falhas de levantamento e não à ausência desses eventos.

9. RESULTADOS ADICIONAIS

O levantamento histórico da pluviometria regional cedido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018) possibilitou a correlação das medições de chuva dos meses em que foram verificados escorregamentos com os acumulados regionais, ressaltando assim a extensão dos episódios anômalos, se locais ou regionais.

A análise dos dados de chuva regionais para o mês de outubro de 2000 contemplada pelos gráficos da Figura 10.1 evidencia uma leve anomalia positiva em relação à média prevista para o período. No entanto, o gráfico de barras ressalta que as chuvas verificadas no mesmo mês nos anos de 1997, 2002 e 2017, superaram a média prevista em mais de 200 mm. Dos anos contemplados neste trabalho (1998 – 2018) por seis vezes o mês de outubro, segundo o INPE (2018), registrou chuvas superiores aos de 2000 na região sudoeste sem verificação de ETS na região de Pato Branco. Porém as precipitações acumuladas no município em outubro de 2010 somaram 291,10mm, superando as análises regionais.

FIGURA 10.1 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2000

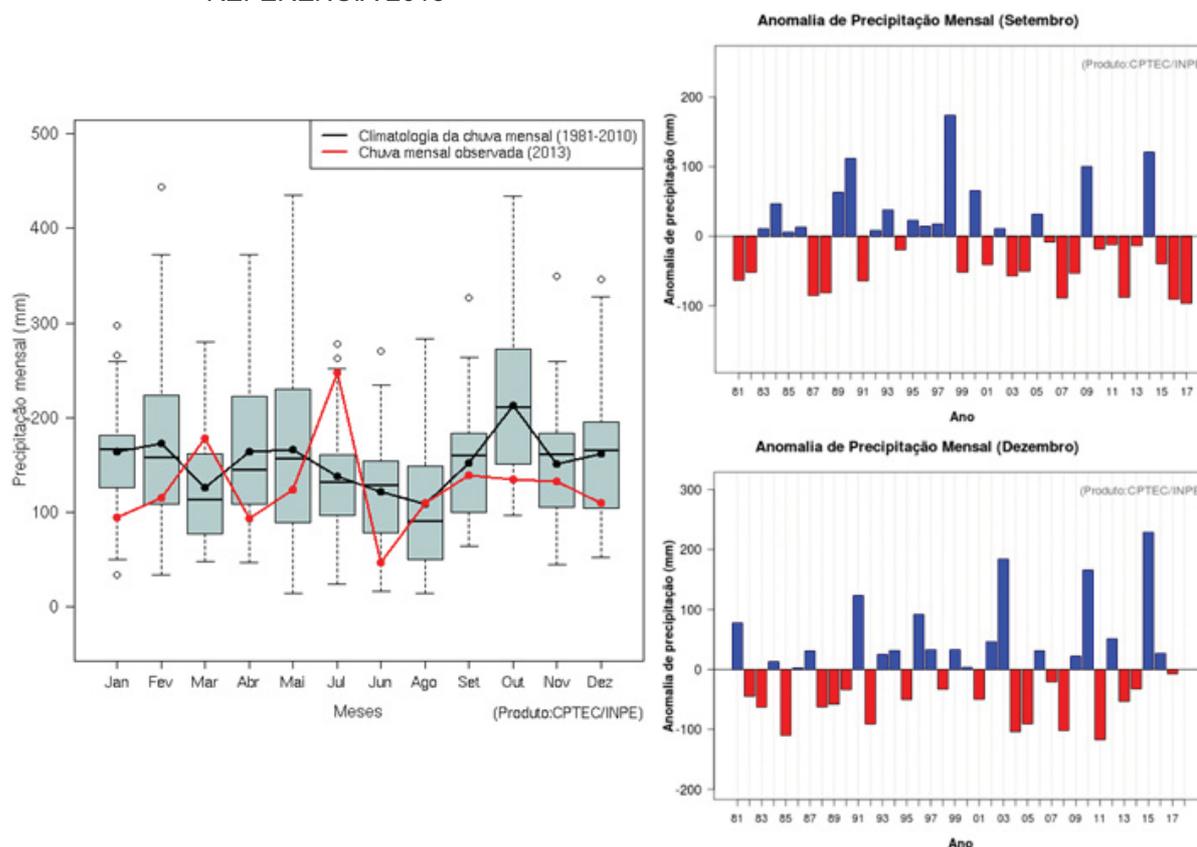


FONTE: CPTEC/INPE (2018)

Quanto a setembro de 2013, onde 16 e 22 foram os dias mais prováveis para ruptura, ambos os gráficos (Figura 10.2) demonstraram um déficit de chuva

mensal em comparação à média, evidenciando uma leve anomalia negativa para o período. O registro de chuva mensal em Pato Branco foi de 247,4mm.

FIGURA 10.2 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2013



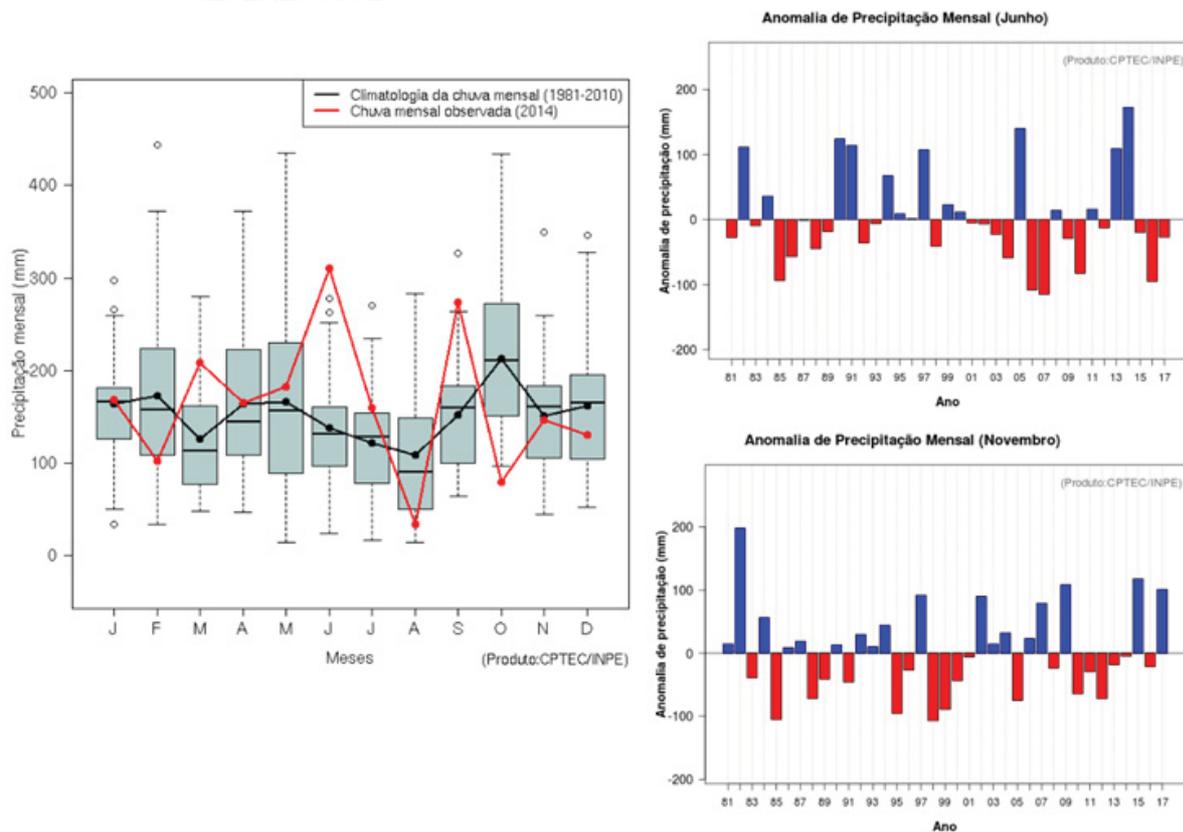
FONTE: CPTEC/INPE (2018)

Em ambos os meses a precipitação local superou a precipitação verificada na região sudoeste. Já em dezembro de 2013, mês em que ocorreu um escorregamento de solo de proporção considerável (02/12/13), ambos os gráficos evidenciaram uma significativa anomalia negativa, com um acumulado de chuva mensal próximo ao mínimo registrado nos 29 anos, cerca de 80 mm inferior a média (Figura 10.2). Em Pato Branco a estação do SIMEPAR registrou 255,2mm de chuva (SIMEPAR, 2018).

O mês de junho de 2014 detém o maior pico de chuva do ano. Nos dias 08 e 27 deste mês aconteceram dois escorregamentos de solo em Pato Branco, as precipitações acumuladas no município para esse mês alcançaram a marca de 336,13 mm. Ambos os gráficos evidenciaram uma forte anomalia positiva em cenário

regional superando em cerca de 220 mm a média aferida para o período e superando ainda os dois eventos extremos registrados ao longo de 29 anos (Figura 10.3).

FIGURA 10.3 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2014

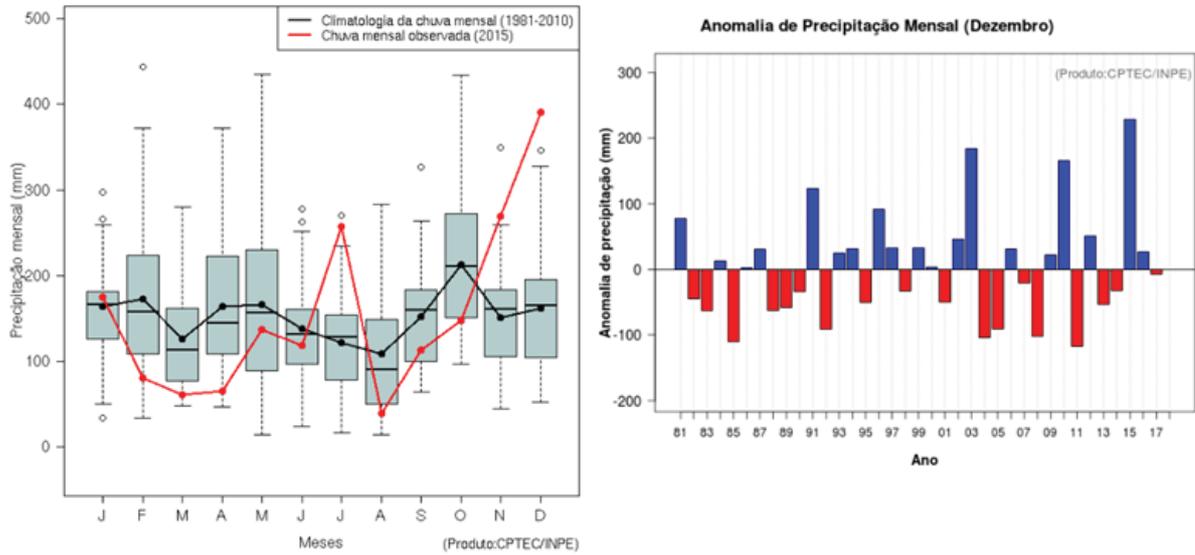


FONTE: CPTEC/INPE (2018)

No mês de novembro, entretanto, a chuva acumulada foi compatível com a média esperada, sendo o pico de chuva mais expressivo para esse mês registrado em 2002 quando o índice acumulado superou a média em 200mm. Na área de estudo a precipitação mensal verificada foi de 234,2mm.

O mês de dezembro de 2015 apresentou chuvas anômalas em todo território nacional, sendo o mais expressivo dentre os demais anos contemplados pela análise do INPE (2018) ultrapassando 400 mm de chuva, superando a média estimada para o período em cerca de 250 mm e superando ainda em cerca de 100 mm o registro pluviométrico extremo para o mês de dezembro (Figura 10.4). Em Pato Branco foram registrados 436,6 mm de chuva (SIMEPAR, 2018).

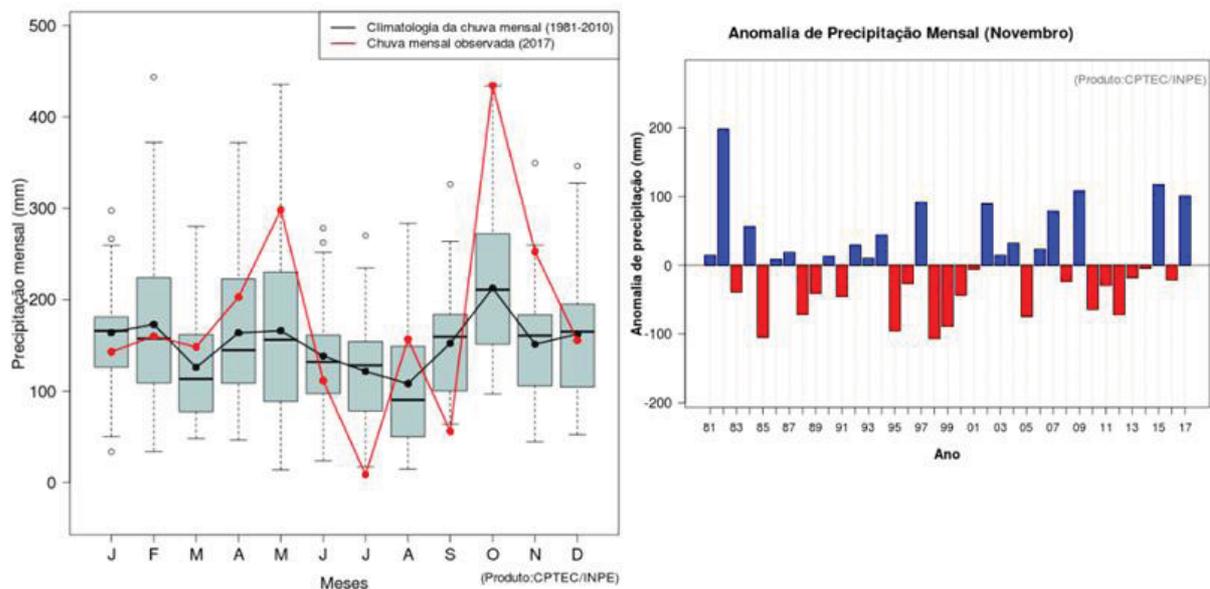
FIGURA 10.4 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2015



FONTE: CPTEC/INPE (2018)

A Figura 10.5 contempla os dados registrados no ano de 2017 e meses de novembro. Em 2017 as chuvas superaram a média em cerca de 150 mm, porem a anomalia mais expressiva do ano ocorreu em outubro onde a pluviometria registrada superou em cerca de 250 mm a média aferida para o período.

FIGURA 10.5 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA PARA A REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ. ANO DE REFERÊNCIA 2017



FONTE: CPTEC/INPE (2018)

A precipitação acumulada do mês de novembro em Pato Branco foi de 270,69 mm (SIMEPAR, 2018). Porém, como o escorregamento ocorreu no dia 04/11/2017, o acumulado hídrico do mês de outubro é bem mais significativo para este evento que o de novembro.

A análise dos dados históricos de chuva da região sudoeste demonstrou que a verificação local comumente supera a precipitação regional, contudo os meses de chuva mais expressivas contemplados pela pesquisa apresentaram medições compatíveis com os registros pluviométricos do sudoeste, indicando que os picos de chuva que causaram movimentos de massa em Pato Branco apresentam característica sazonal em relação às chuvas históricas da região.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo na área urbanizada de Pato Branco permitiu a classificação da área quanto a estabilidade das encostas em distintos cenários de saturação progressiva dos solos. Foram estabelecidas cinco classes de suscetibilidade, de muito alta a muito baixa, considerando ainda a influência da cobertura vegetal no sistema.

Os resultados cartográficos permitiram a compreensão da evolução da estabilidade de um local densamente povoado através das características geotécnicas da área quando afetadas pela presença de água no perfil de solo, sendo 87% das cicatrizes posicionadas em classes de muito alta suscetibilidade a escorregamentos. As análises dos episódios de chuva em que foram deflagrados escorregamentos de solo indicaram que isoladamente nenhum evento de chuva superou a média estabelecida para o mês da deflagração sendo, portanto, classificados como episódios intensos, mas não extremos. Porém em comparação as médias locais históricas, os oito meses em que foram registrados ETS superaram a previsão em até 127%, indicando que os episódios de chuva considerados representam picos sazonais.

Quanto à representatividade da área, a pesquisa mostrou potencial de aplicabilidade nos demais municípios da região sudoeste visto que Pato Branco apresenta características geológicas e geomorfológicas semelhantes às regionais e que a combinação de dados hidrológicos, geotécnicos e geomorfológicos permitiu a identificação dos índices críticos locais, e que estes puderam ser validados pelos registros pluviométricos das datas em que ocorreram escorregamentos de solo.

Tendo em vista os resultados e considerações apresentadas, conclui-se que a estabilidade de um ambiente urbanizado quanto à predisposição da área a ocorrência de escorregamentos é consideravelmente influenciada pelo uso e ocupação do solo. Contudo, o condicionante mais expressivo na deflagração destes processos é o fator climático, mais precisamente a pluviosidade, seja este representado por eventos isolados ou acumulados.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, A.M.G. **Simulação Geológico-Geotécnica Para Avaliação De Estabilidade De Taludes A Partir De Técnicas De Geoprocessamento**. Tese de doutorado em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, p. 245, 2017.
- AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Dados das estações meteorológicas de Pato Branco. Disponível em: <<http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx>>. Acesso em: 21/03/2018, 2018.
- AMARAL, C. P. **Escorregamentos no Rio de Janeiro: inventário, condicionantes e redução do risco**. Tese de Doutorado, Eng. Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1996.
- AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP p. 172, 1994.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. **Estabilidade de Taludes**. In Oliveira, A.M.S. e Brito, S.N.A. (eds) Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo, SP p. 243-269, 1998.
- AUGUSTO FILHO, O.; WOLLE, C. M. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela**, São Paulo, SP. Solos e Rochas, c.19, p. 45-62, 1996.
- ARIOLI, O. A. B., FONSECA, C. R., CRISTO, M., QUEIROZ, G. P. **O grupo Serra Geral no Estado do Paraná - Mapeamento geológico das cartas 1:250.000 de Guaíra, Cascavel, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Guaraniáçu, Guarapuava, Pato Branco e Clevelândia**. MINEROPAR – serviço geológico do Paraná. Curitiba, PR, 2013.
- BARATA, F. E. **Propriedades mecânicas dos solos: Uma introdução ao projeto de fundações**. Livro Técnico e Científico, Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- BARROS, E.T.; AMARAL, C.P.; D'ORSI, R.N. **Landslides susceptibility map of Rio de Janeiro**. Rotterdam: in bell (ed) Landslides, p. 869-871, 1992.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. **A physically based, variable contributing area model of basin hydrology**. Bulletin of Hydrological Sciences, c. 24, p.43-69, 1979.
- BORCHARDT, N. **Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de encostas do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado**. Dissertação de Mestrado em Geologia. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2005.
- BRAND, E.W., PREMCHITT, J., PHILLIPSON H. B. **Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong**. In: Proceedings of 4th International Symposium on Landslides, Toronto, Canada, v.1, p. 377–384, 1984.
- BRAND, E. W. **Landslide risk assessment in Hong Kong**. 5th International Symp. on Landslides, Balkema, Lausanne, p.1059- 1074, 1988.
- BRAND, E.W. **Correlation between rainfall and landslides**. In: Proceedings of 12th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, p. 70-72, 1989.
- BRESSANI, L. A.; BERTUOL, F. **Alguns escorregamentos do RS e SC e a avaliação de susceptibilidade e risco de encostas**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15. Gramado, RS, Anais. São Paulo: ABMS. 1 CD-ROM, 2010.

CARDOSO, A. *et al.* **Levantamento de Reconhecimento dos solos do Paraná**. Tomos I e II. EMBRAPA, S.N.L.C.S, SUDESUL e IAPAR, Curitiba, PR, 1984.

CAMPBELL, R. H. **Isopleth map of landslide deposits, Point Dume Quadrangle, Los Angeles County, California**; an experiment in generalising and quantifying areal distribution of landslides. U.S. Geol. Surv., Miscellaneous Field Studies Map: MF-535, 1973.

CAMPBELL, R. H. **Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Mônica Mountains and vicinity, southern California**. In: US Geological Survey Professional, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, Paper 851, pp. 51, 1975.

CASTRO, J. M. G. **Pluviosidade e Movimentos de Massa nas Encostas de Ouro Preto / MG**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2006.

CARRARA, A. C.; CARDINALI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V.; REICHENBACH, P. **GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard**. Earth Surface Processes and Landforms, c. 16, p. 427-445, 1991.

CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES (CENAD). **Anuário Brasileiro de Desastres Naturais 2011**. Ministério da Integração Nacional. Brasília, DF, 2012.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTC/INPE). Dados históricos de chuva da região sudoeste do Paraná. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/evolucao/pt>. Acesso em 01/04/2018, 2018.

CERRI, L. E. S.; AMARAL, C. P. **Riscos Geológicos**. In Oliveira, A.M.S. e Brito, S.N.A. (eds.) Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo, SP, p. 301-310, 1998.

CHAVES, F.L. **Proposta de correlação chuva vs escorregamento aplicada à cidade do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo, SP, Edgard Blucher, 2 ed., p. 188, 1980.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL) Base topográfica do município de Pato Branco, Escala: 1:1.000. Disponibilizado por: Serviço Geológico do Paraná – MINEROPAR. Curitiba, PR, 2014.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa hidrogeológico da América do Sul – escala 1:5.000.000, Carta SG-22**. Texto explicativo/UNESCO. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, DF, 1996.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa em Pato Branco, Paraná**. Departamento de gestão territorial. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF, 2013.

COROMINAS, J., MOYA, J. **Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain**. Spain, Geomorphology, v.30, p. 79–93, 1999.

COSTA NUNES, A. J. **Landslides in Soils of Decomposed Rock due to Intense Rainstorms**. In International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, México, SMMS, v. 2, p. 547-554, 1969.

CROZIER, M. J. **Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model**. Earth Surf Proc Land v. 24, p. 825–833, 1999.

CROZIER, M.J., EYLES, R. J. **Assessing the probability of rapid mass movement**. In: Proceedings of 3rd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Technical Groups, eds - New Zealand Institution of Engineers, Wellington, New Zealand, v. 6, p. 247–251, 1980.

CRUDEN, D. M. **Estimating the risks from landslides using historical data**. In Cruden, D.M. e Fel, R. (eds.) Landslide Risk Assessment. Balkema, Rotterdam, p. 177-184, 1997.

D'ARÓZ, P. **Suscetibilidade a escorregamentos translacionais de solo em vertentes e estabilidade de taludes da porção limítrofe entre a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense**. Monografia de Conclusão do curso de Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2015.

DEFESA CIVIL DO PARANÁ. Mapa de ocorrências de acidentes naturais no estado do Paraná. Disponível em: <<http://www.geo.pr.gov.br/ms4/sisdc/publico/ocorrencias/geo.html>> Acesso em: 25/04/2018, 2018.

DEFESA CIVIL DO PARANÁ. Relatório de ocorrências de acidentes naturais urbanos no município de Pato Branco, PR. Disponível em: <<http://www.defesacivil.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=56>>. Acesso em: 25/04/2018, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Normas para o projeto das estradas de rodagem**. Reimpr. Rio de Janeiro, RJ, 1973.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Projetos e Práticas Operacionais para segurança nas Rodovias**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

DIÁRIO DO SUDOESTE. Jornal eletrônico 06/11/2017. Deslizamentos em Pato Branco. Disponível em: <https://www.diariodosudoeste.com.br/noticia/enxurrada-provoca-desmoronamento-em-obra-no-centro-de-pato-branco>. Acesso em 04/04/2018, 2017.

DIETRICH, W.; D. MONTGOMERY. **SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential**. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement (NCASI), p. 29, 1998.

DIKAU, R. **Geomorphic Landform Modeling Based on Hieratchy Theory**. In: Brassel, K. Kishimoto, H. (Eds.), Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling. Department Of Geography, University of Zurich. Zurich, Switzerland, p. 230 -239, 1990.

D'ORSI, R.N. **Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da serra dos órgãos da rodovia federal BR-116 RJ (Rio-Teresópolis)**. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, p. 287, 2011.

ELBACHÁ, A.T., CAMPOS, L.E.P., BAHIA, R.F.C. **Tentativa de correlação entre precipitação e deslizamentos na cidade de Salvador**. In: Anais da 1ª Conferência Brasileira sobre estabilidade de Encostas (1ª COBRAE). Rio de Janeiro, RJ, v.2, p. 647-656, 1992.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço nacional de levantamento e conservação dos solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR. Curitiba, PR, Boletim técnico n° 40, p. 79, 1974.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço nacional de levantamento e conservação dos solos. Mapa de Levantamento e reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. EMBRAPA- IAPAR. Londrina, PR, Escala 1:600.000, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Disponível em: < <https://>

//publicacao/336076/levantamento-de-reconhecimento-dos-solos-do-estado-do-parana>. Acesso em: 25/05/2016, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Embrapa produção de informações. Rio de Janeiro, RJ, Embrapa Solos, 2 ed, p. 306, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa de Solos do Estado do Paraná. Carta MI516, SG-22-X-D**. Mapeamento Sistemático, escala 1:250.000, 2008.

ENDO, T **Probable distribution of the amount of rainfall causing landslides**. Annual report, Hokkaido Branch, Govern. Forest Experiment Station, Sapporo, Japan, p.123– 136, 1970.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS, Spatial Analyst, 3D Analyst**, versão 10.2. San Diego, California, USA, 2015.

FACETO, M. C. R. et al. **Relação entre a Precipitação e a Ocorrência de Deslizamentos no Município de São Bernardo do Campo, SP**. Santo André: UFABC, 2012.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica De Terreno**. In: Câmara, G; Medeiros, J. S. (Org). Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos, SP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ed. 2, p. 4-39, 1998.

FENDRICH, R. **Chuvas Intensas para Obras de Drenagem no Estado do Paraná**. 2ed. Revisada e ampliada. Editora Vicentina. Curitiba, PR, 2003.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico - geomorfológico**. In Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, RJ, Bertrand, p.123-194, 1996.

FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., VIEIRA, C. B., MONTEGONERY, D. R., GREENBERG, H. **Condicionantes Geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologia e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 2 n° 1, p. 51-71, 2001.

FIORI, A.P. **Estudo da estabilidade de vertentes da área de Guaraqueçaba, Paraná**. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, PR, v. 43, p. 25-40, 1995^a.

FIORI, A.P. **Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas**. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, PR, v. 43, p. 7-24, 1995^b.

FIORI, A. P.; BORCHARDT, N. **Influência da vegetação na estabilidade de taludes naturais**. Curitiba: Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, PR, v. 45, p. 43-58, 1997.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Editora da UFPR, Curitiba, PR, 2001.

FIORI, A.P.; NUNES, F.G. **Áreas de risco e dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar - PR**. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, PR, v. 53, p. 45-58, 2003.

FIORI, A. P. E CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Aplicação na estabilidade de taludes**. 2ª edição revisada e ampliada. Editora da UFPR, Oficina de Textos. Curitiba, PR, 2009.

FREIRE, E.S DE M. **Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática**. Revista Construção, Rio de Janeiro, RJ, p. 10-18, 1965

FÚLFARO, V.J.; SAAD, A.R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B. **Compartimentação e evolução tectônica da bacia do Paraná**. In: Geologia da Bacia do Paraná: reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos. São Paulo, SP, IPT, p. 75-115, 1982.

GAO, J. **Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia**, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms*, c.18, p. 579- 591, 1993.

GEE, M. D. **Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability**. 6th Int. Symp. on Landslides, A. A. Balkema, Christchurch, p. 947-952, 1992.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de Taludes**. Primeira Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2012.

GIRARDI, G. **Análise preliminar da estabilidade de encostas e taludes de Almirante Tamandaré e Colombo**. Dissertação de Mestrado em Geologia. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 1999.

GLADE, T., CROZIER, M.J., SMITH, P. **Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical ‘Antecedent Daily Rainfall Model**. *Pure Appl Geophys*, v.157(6/8), p. 1059–1079, 2000.

GRAMANI, M.F. **Caracterização geológica geotécnica das corridas de detritos “Debris Flows” no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Solos – EPUSP - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2001.

GUIDICINI, G. E IWASA, O.Y. **Ensaio de Correlação entre Pluviometria e Deslizamentos em Meio Tropical Úmido**. In: Simpósio Landslides and other Mass Moviment da IAEG, Praga, Publicação 1080 IPT, 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. 1983. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, p.194.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2.ed. Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo., SP, p. 194, 1984.

GUIMARÃES, R. F. **A modelagem matemática na avaliação de áreas de risco a deslizamentos: o exemplo das bacias dos rios Quitite e Papagaio (RJ)**. Tese de Doutorado em Geologia, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2000.

GUIMARÃES, R. F.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; GREENBERG, H. M.; MONTGOMERY, D. R.; CARVALHO JR., O. A. **Statistical analysis of sensitive soil parameters in a mathematical model for shallow landslide prediction**. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. **Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy**. *Geomorphology*, c. 31, p. 181-216, 1999.

GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M. & STARK C.P. Rainfall thresholds for the initiation of Landslides in Central and Southern Europe. Disponível em:<<http://www.irpi.cnr.it>>. Acesso em: 22/06/2017, 2007.

HAMMOND, C. J.; PRELLWITZ, R. W.; MILLER, S. M. **Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation**. 6th International Symposium on Landslides, A. A. Balkema, Christchurch, p. 959-964, 1992.

IDE, F. S., MACEDO, E. S. **Investigação da relação chuva e escorregamento no município de Campinas (SP)**. In: Anais do 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental (em CD), Florianópolis, SC, 2005.

INFANTI JR, N.; FORNASARI FILHO, N. **Processo de dinâmica superficial**. In: Oliveira, A. M. dos S.; Brito, S. N.A. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, SP, ABGE, 1998.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). Dados climatológicos do estado do Paraná. In: <<http://www.iapar.br/pagina-856.html>> Acesso em: 21/03/2018, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010 do município de Pato Branco, Paraná. In: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/dtbs/parana/patobranco.pdf>>. Acesso em 25/05/2016, 2010.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). Caderno Estatístico do Município de Pato Branco. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=120&btOk=ok>. Acesso em: 25/05/2016, 2012.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Leituras Regionais do Município de Pato Branco**. Mesorregião Geográfica do Sudoeste do Paraná. Curitiba, PR, 2012.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMEPAR. Dados meteorológicos do Município de Pato Branco/Paraná - período 1998 - 2018. Curitiba, PR, 2018.

JERRAM, D.; MOUNTNEY, N.; HOLZFORSTER, F.; STOLLHOFEN, H. **Internal stratigraphic relationships in the Etendeka Group in the Huab Basin, NW Namibia : understanding the onset of flood volcanism**. Journal of Geodynamics, Amsterdam, v. 28, n. 4-5, p. 393-418, 1999.

JIBSON, R. W. **Debris flow in southern Porto Rico**. Geological Society of America, Special Paper nº. 236, p. 29–55, 1989.

KOZCIAK, S. **Análise da estabilidade de vertentes na bacia do Rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná**. Tese de doutorado em Geologia. Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2005.

LARSEN, M. C.; TORRES-SANCHEZ, A. J. **The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico**. Geomorphology, v.24, p. 309-331, 1998.

LEROI, E. **Landslide risk mapping: problems, limitations and developments**. In Cruden, D.M. e Fell, R. (eds.) Landslide Risk Assessment. Balkema, Rotterdam, p. 239-250, 1997.

LICHT, O. A. B., FONSECA, C. R., MORETTI, M. A., SILVEIRA, D. F. **Estudo de produtos hidrovulcânicos no sudoeste do Paraná. Projeto mapeamento da Formação Serra Geral**. MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná. Curitiba. PR, 2012.

LUMB, P. **Slope failures in Hong Kong. Department of civil engineering**, University of Hong Kong. Engineering Geology, China, v. 8, p. 38-65, 1975.

MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, p. 255, 1997.

MILANI, E.J. ; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, v. 8, n. 1, p. 69-82, 1995.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G., SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. E FRANÇA, A. B. **Bacia do Paraná**. In: Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MILANI, E.J., ZALÁN, P.V. **Brazilian Geology Part 1: the Geology of Paleozoic Cratonic Basins and Mesozoic Interior Rifts of Brazil**. In: AAPG, International Conference & Exhibition, Rio de Janeiro, RJ, Short Course Notes, 1998.

MOLINA E.A.N., CARDOSO, A.O., NOGUEIRA, F.R. **Relação precipitação-deslizamento no município de São Bernardo do Campo – SP.** Revista Ciencia e Natura, Santa Maria, v. 37 Ed. Especial SIC, p. 46-54, 2015.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. **A physically based model for the topographic control on shallow landsliding.** Water Resources Research DOI: 10.1029/93WR02979, c. 30, p. 1153-1171, 1994.

MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro, RJ, ABES, 1999.

MULDER, H. F. H. M.; VAN ASCH, T. W. J. **A stochastic approach to landslide hazard determination in a forested area.** 5th Int. Symp. on Landslides. Balkema, Lausanne, p. 1207-1210, 1988.

NIELSEN, T. H.; BRABB, E. E. **Slope stability studies in the San Francisco Bay region, California.** Reviews in Engineering Geology-GSA, c. 3, p. 235-243, 1977.

NUNES, F.G. **Levantamento de áreas de riscos a partir da dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar no Paraná.** Dissertação de Mestrado em Geologia. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2002.

O'LOUGHLIN, E. M. **Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis.** Water Resources Research, c. 22(5), p. 794-804, 1986.

OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J. L. S. **Atlas Geomorfológico do Estado de Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000.** Curitiba, PR, Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR), 2006.

PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN, C.N. **Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.0.** Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, Canada. p. 68, 1998^a.

PACK, R.T.; TARBOTON D.G.; GOODWIN, C.N. **The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping.** In.: 8th Congress of the 297 International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, p. 21-25, 1998^b.

PACK, R.T.; TARBOTON D.G.; GOODWIN, C.N. **Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP.** In: 15th Annual GIS Conference, Vancouver, British Columbia, p. 1-9, 2011.

PEDROZZI, G. **Triggering of landslides in Canton Ticino (Switzerland) and prediction by the rainfall intensità and duration method.** Bull Eng Geol Environ v.63(4), p. 281–291, 2004.

PRANDINI, L. F.; GUIDICINI, G.; BOTTURA, J.A. **Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais.** In: Bitar, O. Y. Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. São Paulo, SP, – ABGE/IPT, 1995.

POMPEAU, G., SOLIANI JR., E.; KAWASHITA, K., BAITELLI, R., BERBERT, M., E CESAR, M.F. **Um perfil geocronológico (K/Ar – traços de fissão) leste - oeste no Escudo Sul - Riograndense.** In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 2. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia. Florianópolis, SC, p. 219-237, 1985.

RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L.; GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F.; CARVALHO FILHO, O. A. **Aplicação do modelo shalstab, em ambiente arcview para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na região do Quadrilátero Ferrífero - MG.** Espaço e Geografia, v.5, n.1, p.49-57, 2002.

RODRIGUES, J.E. **Estudo de fenômenos erosivos acelerados – Boçorocas.** Tese de doutorado em engenharia – departamento de vias de transporte e topografia, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, 160f, 1982.

SALOMAO, F.X DE T.; ANTUNES, F. DOS S. **Solos e pedologia**. In: Oliveira, A. M. do S.; Brito, S.N.A. Geologia de engenharia. São Paulo, SP, Oficina de Textos. P. 87-99, 1998.

SANTOS, M. R. G. **Aplicação de métodos de geoprocessamento para o estudo da instabilidade de encostas no Município de Teresópolis - RJ**. Tese de Mestrado em Geologia. Departamento de Geologia, UFRJ, 2000.

SCHERER, C.M. **Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, Southern Brazil**. Sedimentology, Oxford, v. 49, n.1, p. 97-116, 2002.

SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO URBANO (PARANACIDADE). Base topográfica do município de Pato Branco, escala: 1:1.000. Disponibilizado por: Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR). Curitiba, PR. 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SEMA). **Bacias Hidrográficas do Paraná – Série Histórica**. Curitiba, PR, 2010.

SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. **Hillslope Stability and Land Use**. American Geophysical Union, Washington, p. 141, 1985.

SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, J.; SILVA DIAS, P. L.; FREITAS, ED. D.; CARVALHO, L. M. V. **Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil**. Climatic Change, v. 116, p. 705-722, 2013.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L.J.C.; SIRTOLI, A. E.; DA SILVA, C. R. **Pedometria Apoiada em Atributos Topográficos com Operações de Tabulação Cruzada por Álgebra de Mapas**. In: Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 13, nº 2, p. 125-137, 2012^a.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; FELIPE, R. S.; FILHO, J.L.K.; FOLADOR, R.M.; COSTA, L.C.; **Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense**. In: Revista Brasileira de Geomorfologia. v. 13, nº 3, p. 287-297, 2012.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. **Emprego de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de relevo apoiado em atributos topográficos e árvores de decisão**. In: Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, nº 1, 87 – 101, 2014.

SILVEIRA, R. M. P. **Análise digital do relevo como apoio para a cartografia geomorfológica da porção central da serra do mar paranaense**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2015.

SOARES, E.P. **Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, COPPE, p. 145, 2006.

STEVENSON, P. C. **An empirical method for the evaluation of relative landslide risk**. Bull. Int. Assoc. of Engineering Geologists, c.16, p. 69-72, 1977.

STYCZEN, M.; MORGAN, R.P.C. **Engineering properties of vegetation**. Morgan, R.P.C., Rickson, R.J. (ed.), E&FN SPON, London, 274f, c. 2, p. 2-58, 1995.

TABALIPA, N. L. **Estudos da estabilidade de vertentes da Bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná**. Tese de doutorado em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2008.

TABALIPA, N. L. **Proposta para o Desenvolvimento Urbano do Município de Pato Branco, Paraná, Baseada em Critérios Geológicos e Geomorfológicos**. Dissertação de Mestrado em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2002.

TATIZANA, C., OGURA, A. T., CERRI, L. E. S. **Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos, Serra do mar, Município de Cubatão.** Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo, SP. IPT, 1987.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E.; ROCHA, M. C. M. **Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos, Serra do Mar, Mun. de Cubatão.** 5o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo, SP, p. 225-236, 1987^a.

TATIZANA, C., OGURA, A. T.; CERRI, L. E.; ROCHA, M. C. M. **Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão.** 5o Congr. Bras. Geol. Eng., ABGE, São Paulo, SP, p. 237-248, 1987^b.

TOMAZONI, J. C. **Morfodinâmica e transporte fluvial no sudoeste do estado do Paraná por método de levantamento de microbacias hidrográficas através de geoprocessamento.** Tese de doutorado em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. PR, 2003.

TOMINAGA, L. K. **Desastres Naturais: por que ocorrem?** In: Tominaga, L. K.; Santoro, J.; Amaral, R. (org). Desastres naturais: conhecer para prevenir. Instituto de Geociências. São Paulo, SP, 2009.

VAN WESTEN, C. J. **Application of geographic information system to landslide hazard zonation.** ITC Publication, Enschede, The Netherlands, c.15, p. 245, 1993.

VARGAS, M. **Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos na Serra do Mar.** Boletim Solos e Rochas (ABMS e ABGE). São Paulo, SP, v. 22 n° 1, 1999.

VARNES, D. J. **Slope Movement Types and Processes. Landslides Analysis and Control,** Washington, D. C., National Academy of Sciences, p.11-33, 1978.

VIEIRA, R. **Um olhar sobre a paisagem e o lugar como expressão do comportamento frente ao risco de deslizamento.** Tese de Doutorado em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2004.

VIEIRA, B.C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar, (SP), a partir de modelos matemáticos em bases físicas.** Tese de Doutorado em Geografia. Programa de Pós Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, p. 193, 2007.

WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis.** Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, California, USA, 2001.

WIECZOREK, G. F. **Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction.** Bulletin Association of Engineering Geologists, c. 21, p. 337-342, 1984.

WIECZOREK, G. F. **Landslide triggering mechanisms.** In: Landslides: Investigation and Mitigation (Turner AK, Schuster RL eds). Transportation Research Board, National Research Council, Special Report, Washington, DC, p. 76-90, 1996.

WIECZOREK, G. F., GLADE, T. **Climatic factors influencing occurrence of debris flows.** In: Debris flow Hazards and Related Phenomena, Jakob M, Hungr O, Eds., Springer Berlin Heidelberg, p. 325–362, 2005.

WILDNER, W.; SANDER, A.; ROMANINI, S.J. **Texturas e estruturas dos lagos de lava Serra Geral.** In: Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Boletim de Resumos 2ed. Sociedade Brasileira de Geologia. Belém, PA, 2006.

WILSON, R. C. **Rainstorms pore pressure, and debris flows: a theoretical framework** In: Landslides in a semi-arid environment, Morton DM, Sadler PM, Eds., California: Publications of the Inland Geological Society, c. 2, p. 101-117, 1989.

WOLLE C.M. **Slope stability**. In: International conference on tropical lateritic and saprolitic soils. ABMS, 1, Brasília, DF, 1985.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil**. Solos e Rochas, v.12, p. 27-36, 1989.

WOLLE C.M. **Análise de escorregamento translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 800f, 1988.

WRIGHT, R. H.; CAMPBELL, R. H.; NILSEN, T. H. **Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits**. Geology, v.2, p. 483-485, 1974.

WU, T.H.; MCKINNELL, W.P.III.; SWANTON, D.N. **Strength of the roots and landslides on prince of wales island, Alaska**. Canadian Geotechnical, v.16, p. 19-33, 1979.

