

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



TESE DE DOUTORADO

Nikolai da Silva Espinoza

**Análise da ocorrência de eventos de deslizamentos
no município de Jaboaão dos Guararapes e sua
relação com eventos hidrometeorológicos**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA - PPGMET

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE EVENTOS DE DESLIZAMENTOS NO
MUNICÍPIO DE JABOATÃO DOS GUARARAPES E SUA RELAÇÃO COM
EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS**

NIKOLAI DA SILVA ESPINOZA

Campina Grande – PB

2021

NIKOLAI DA SILVA ESPINOZA

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE EVENTOS DE DESLIZAMENTOS NO
MUNICÍPIO DE JABOATÃO DOS GUARARAPES E SUA RELAÇÃO COM
EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escala

Campina Grande – PB

Setembro/2021

E77a

Espinoza, Nikolai da Silva.

Análise da ocorrência de eventos de deslizamentos no município de Jabotão dos Guararapes e sua relação com eventos hidrometeorológicos / Nikolai da Silva Espinoza. – Campina Grande, 2021.

90 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

“Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos”.

Referências.

1. Meteorologia de Meso e Grande Escala. 2. Setores de Risco. 3. Limiares de Precipitação. 4. Costa Leste do Nordeste Brasileiro (CLNEB). 5. Monitoramento. 6. Modelagem Numérica. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Título.

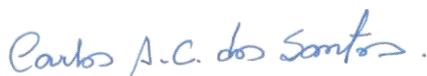
CDU 551.515.6(043)

NIKOLAI DA SILVA ESPINOZA

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE EVENTOS DE DESLIZAMENTOS NO MUNICÍPIO
DE JABOATÃO DOS GUARARAPES E SUA RELAÇÃO COM EVENTOS
HIDROMETEOROLÓGICOS

TESE APROVADA EM 29/09/2021

BANCA EXAMINADORA



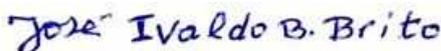
Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal
de Campina Grande



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



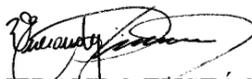
Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal
de Campina Grande



Prof. Dr. HELBER BARROS GOMES

Instituto de Ciências Atmosféricas. Universidade
Federal de Alagoas



Prof. Dr. VENERANDO EUSTÁQUIO AMARO

Departamento de Engenharia Civil Universidade Federal
do Rio Grande do Norte



Prof. Dr. MARCOS BARRETO DE MENDONÇA

Departamento de Construção Civil

Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares paternos e maternos, especialmente à minha mãe e pai pelo amor, apoio e incentivo para conseguir alcançar meus objetivos e mesmo não estando fisicamente próximos de mim, sinto a energia amorosa emanada por eles.

AGRADECIMENTOS

A Deus, ao proporcionar motivação para enfrentar todas as dificuldades que surgirem em minha vida e entender o processo da renovação.

A minha família e aos amigos que estiveram presente em momentos bons e ruins e por ter compartilhado a alegria, companheirismo, solidariedade e dor em situações que foram necessárias.

A Rosaria Rodrigues, pelo amor, carinho, amizade, paciência, companheirismo e por estar ao meu lado em um período bastante doloroso e de sofrimento.

Aos professores do curso de meteorologia da UFCG pela obtenção de novos aprendizados na área de meteorologia, em especial ao meu orientador, prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos, pela orientação e confiança para seguir desenvolvendo a minha pesquisa.

A todas as amigadas que foram construídas durante o curso de meteorologia no doutorado, e que contribuíram com conselhos, dicas e informações para a melhoria da pesquisa.

A Arilene por contribuir com informações voltadas ao curso de meteorologia e que são repassadas pela secretaria de Pós-graduação da UACA.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) por todo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) pela disponibilização dos dados usados nesta pesquisa.

Aos membros da banca que avaliaram e contribuíram com sugestões e correções no presente trabalho.

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.”

(NIKOLA TESLA)

RESUMO

Dada a crescente ocorrência de deslizamentos na Costa Leste do Nordeste Brasileiro (CLNEB), e considerando a vulnerabilidade do município pernambucano de Jaboatão dos Guararapes, torna-se relevante compreender a relação existente entre a chuva e os movimentos de massa para contribuir com medidas de redução do risco de desastres relacionados com deslizamentos neste município. Neste sentido, o objetivo principal desta pesquisa foi relacionar a precipitação com as ocorrências de deslizamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, decorrentes de precipitações diárias e acumuladas em dias anteriores no período de 2016 a 2020, bem como identificar as áreas mais afetadas a ocorrências de deslizamentos no município. Buscou-se analisar as ocorrências de deslizamentos e precipitação quanto à variabilidade temporal e espacial, assim como analisar um evento extremo de chuva através de parâmetros meteorológicos que deflagaram ocorrências de deslizamentos em várias cidades da CLNEB em maio de 2017. Também foi avaliado a habilidade de um modelo numérico regional em representar a chuva desse evento. Para realização deste estudo, foram utilizadas informações que permitiram identificar as áreas com maior ocorrência a deslizamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, avaliar a variabilidade espaço-temporal da ocorrência de precipitação e deslizamentos, analisar a quantidade de precipitação necessária para a ocorrência de deslizamentos, verificar as condições atmosféricas de um evento relevante na CLNEB e examinar a habilidade do modelo regional climático *Regional Climate Model* (RegCM) em representar a variabilidade espaço-temporal da chuva do estudo de caso. O conjunto de dados incluiu mapas anuais de uso e ocupação do solo; dados vetoriais de suscetibilidade e setores de risco à deslizamentos; relatórios de ocorrências de deslizamentos; boletins meteorológicos; além de registros de precipitação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Os resultados mostraram que ao longo dos anos, o município de Jaboatão dos Guararapes, passou por uma intensa transformação em seu espaço urbano, com o aumento da população habitando áreas impróprias para moradia, e conseqüentemente, criando diversas áreas de risco na cidade. Esse acelerado processo de urbanização, aliado a acumulados de chuva acabaram contribuindo de forma bastante decisiva para a ocorrência de deslizamentos. A relação entre os deslizamentos e a chuva através de limiares de precipitação utilizando a relação da precipitação acumulada do evento e a sua duração (ED) e a intensidade com a duração (ID) mostraram que os deslizamentos são influenciados por chuvas tanto de curta como de longa duração, sendo o maior predomínio de casos observados em períodos de curta duração. O limiar de precipitação ED apresentou melhor desempenho em relação ao limiar ID, conforme verificado pelo valor do coeficiente de determinação (R^2). O estudo de caso do evento extremo de chuva na CLNEB que aconteceu em maio de 2017, causou deslizamentos em Jaboatão dos Guararapes assim como em outros municípios de Alagoas, Pernambuco e Paraíba, demonstrando a fragilidade do terreno a este tipo de ameaça natural na CLNEB. A investigação sobre os aspectos meteorológicos mostrou que este evento estava associado à convergência de umidade em baixos níveis sobre o Oceano Atlântico. Em níveis atmosféricos elevados, observou-se que os maiores núcleos de divergência do vento resultaram da convecção da superfície. Diante desses resultados, verificou-se a necessidade de monitoramento contínuo das condições atmosféricas na CLNEB, devido à importância da obtenção de previsões de qualidade sobre a precipitação na região. Da mesma forma, explorar a relação entre os processos de precipitação e deslizamento nesta região poderá fornecer critérios objetivos de avaliação de risco.

Palavras-chave: Setores de risco; limiares de precipitação; CLNEB; monitoramento; modelagem numérica.

ABSTRACT

Given the increasing occurrence of landslides on the East Coast of Northeast Brazil (CLNEB), and considering the vulnerability of the Pernambuco municipality of Jaboatão dos Guararapes, the relationship between rainfall and mass movements is relevant to contribute with measures to reduce water risk of landslide-related disasters in this municipality. In this sense, the main objective of this research was to relate the precipitation with the occurrence of landslides in the municipality of Jaboatão dos Guararapes, resulting from daily rainfall and accumulated in previous days in the period from 2016 to 2020, as well as to identify the areas most affected by occurrences of landslides in the municipality. We sought to analyze the occurrences of landslides and precipitation in terms of temporal and spatial variability, and also to analyze an extreme rain event through meteorological parameters that triggered occurrences of landslides in several CLNEB cities in May 2017, as well as to assess the ability to a regional numerical model in representing the rainfall of that event. To carry out this study, information was used that allowed to identify the areas with the highest occurrence of landslides in the municipality of Jaboatão dos Guararapes, to assess the spatial and temporal variability of the occurrence of precipitation and landslides, to analyze the amount of precipitation necessary for the occurrence of landslides, to verify the atmospheric conditions of a relevant event at CLNEB and examining the ability of the regional climate model Regional Climate Model (RegCM) to represent the case spatiotemporal variability of rainfall in the case study. The dataset included annual land use and occupation maps; vector data of susceptibility and landslide risk sectors; landslide occurrence reports; weather reports; in addition to rainfall records from the National Center for Monitoring and Natural Disaster Alerts (CEMADEN). The results showed that over the years, the municipality of Jaboatão dos Guararapes has undergone an intense transformation in its urban space, which has contributed to the increase of people living in unsuitable areas for housing, and consequently, creating several risk areas in the city. This accelerated urbanization process, combined with accumulated rainfall, ended up contributing in a very decisive way to the occurrence of landslides. The relationship between landslides and rainfall through precipitation thresholds using the relation of accumulated precipitation of the event and its duration (ED) and intensity with duration (ID) showed that landslides are influenced by both short and long duration rains, with the greatest predominance of cases observed in short periods. The precipitation threshold ED performed better in relation to the threshold ID, as verified by the value of the coefficient of determination (R^2). The case study of the extreme rain event at CLNEB which took place in May 2017, caused landslides in Jaboatão dos Guararapes as well as in other municipalities in Alagoas, Pernambuco and Paraíba, demonstrating the fragility of the terrain to this type of natural threat at CLNEB. Investigation into meteorological aspects showed that this event was associated with the convergence of moisture at low levels over the Atlantic Ocean. At high atmospheric levels, it was observed that the largest wind divergence cores resulted from surface convection. Given these results, there was a need for continuous monitoring of atmospheric conditions in CLNEB, due to the importance of obtaining quality forecasts on rainfall in the region. Likewise, exploring the relationship between precipitation and landslide processes in this region can provide objective criteria for risk assessment.

Keywords: Risk sectors; precipitation thresholds; CLNEB; monitoring; numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema ilustrativo de um deslizamento planar ou translacional. Fonte: < http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html > Acesso em: 12 ago. 2019.	8
Figura 2. Deslizamento planar de solo em Guaratinguetá, SP. Fonte: IPT/CTGEO.....	8
Figura 3. Esquema ilustrativo de um deslizamento circular ou rotacional. Fonte: < http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html > Acesso em: 12 ago. 2019.	9
Figura 4. Deslizamento rotacional de solo em Rio Claro, RJ. Fonte: Thiago Dutra, 2016.....	9
Figura 5. Esquema ilustrativo de um deslizamento em cunha. Fonte: < http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html > Acesso em: 12 ago. 2019.	10
Figura 6. a) Esquema ilustrativo de um fluxo de detritos. b) Bacia de drenagem afetada por fluxo de detritos em Itaoca, SP. Fonte: Rafael Ribeiro, 2016; Foto: IPT/CTGEO.	11
Figura 7. a) Esquema ilustrativo de uma queda de blocos. b) Área afetada por queda de blocos no Espírito Santo. Fonte: Rafael Ribeiro, 2016; Foto: Defesa Civil do Espírito Santo, 2016.	12
Figura 8. Frequência anual de movimentos de massa ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012. Fonte: Adaptado de CEPED (2013).	15
Figura 9. Residências construídas em áreas de riscos sujeitas a eventos de deslizamentos na cidade de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco. 1 – Centro, 2 – Engenho Velho, 3 – Cavaleiro, 4 – Curado. Fonte: CPRM.	20
Figura 10. Número de deslizamentos em encostas registrados no município de Jaboatão dos Guararapes entre 2006 e 2010. Fonte: Defesa Civil de Jaboatão dos Guararapes.	21
Figura 11. Limiar pluviométrico ID para a região norte da Turquia. Os pontos azuis representam as chuvas que não causaram deslizamentos e os vermelhos as chuvas que tiveram relação com deslizamentos.	23
Figura 12. (a) Localização geográfica da Região Metropolitana de Recife (RMR); (b) Regiões político-administrativas de Jaboatão dos Guararapes (Regionais: 1. Jaboatão Centro; 2. Cavaleiro; 3. Curado; 4. Muribeca; 5. Prazeres; 6. Praias; 7. Guararapes.	27
Figura 13. Distribuição anual da precipitação média em Jaboatão dos Guararapes pelo histórico mensal de 1994 a 2017. Fonte: COUTINHO et al., (2020).....	29

Figura 14. Padrões de relevo situados no município de Jabotão dos Guararapes. (Fonte de dados: CPRM).	30
Figura 15. Evolução do uso e ocupação do solo no município de Jabotão dos Guararapes de 1985 até 2015.	41
Figura 16. Áreas de suscetibilidade alta e setores de risco a deslizamentos em Jabotão dos Guararapes.	43
Figura 17. (a) Distribuição espacial e (b) percentual das ocorrências de deslizamentos nas 7 Regionais administrativas em Jabotão dos Guararapes.	44
Figura 18. Mapa de altitude em metros associado com os casos de deslizamentos registrados em Jabotão dos Guararapes.....	45
Figura 19. Total anual das ocorrências de deslizamentos entre 2016 e 2020 registrados em Jabotão dos Guararapes juntamente com a localização de cinco estações de medição de precipitação.....	45
Figura 20. Frequência mensal da ocorrência de deslizamentos nas Regionais de Jabotão dos Guararapes no período de 2016 a 2020.	46
Figura 21. Total mensal da ocorrência de deslizamentos (linha) e precipitação (barras) no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2020 na estação pluviométrica do Centro em Jabotão dos Guararapes.	47
Figura 22. Distribuição espacial da precipitação no período chuvoso (abril – julho) no município de Jabotão dos Guararapes entre 2016 a 2020.....	48
Figura 23. Acumulados diários de precipitação obtidos pelas estações pluviométricas de Jabotão dos Guararapes para os dias com ocorrências de deslizamentos.....	50
Figura 24. Acumulados de precipitação em 4 dias anteriores obtidos pelas estações pluviométricas de Jabotão dos Guararapes para os dias com ocorrências de deslizamentos.	50
Figura 25. Limiar pluviométrico ED a partir de dados diários de precipitação para o município de Jabotão dos Guararapes. Os pontos azuis representam as chuvas que não causaram deslizamentos e os vermelhos as chuvas que tiveram relação com deslizamentos. .	53
Figura 26. Limiar pluviométrico ID a partir de dados diários de precipitação para o município de Jabotão dos Guararapes. Os pontos azuis representam as chuvas que não causaram deslizamentos e os vermelhos as chuvas que tiveram relação com deslizamentos.	54
Figura 27. Precipitação acumulada antecedente para os dias de ocorrência de deslizamentos em Jabotão dos Guararapes no período de 24h, 48h, 72h e 96h.....	55

Figura 28. Intervalo de precipitação acumulada antecedente em 72 horas para os casos de deslizamentos registrados em cada Regional distribuída em Jaboatão dos Guararapes. a) Regional Jaboatão Centro, b) Cavaleiro, c) Curado, d) Muribeca, e) Prazeres, f) Praias e g) Gurarapes.....	57
Figura 29. Registros de deslizamentos em municípios de Alagoas, Paraíba e Pernambuco entre os dias 24 a 31 de maio de 2017, juntamente com o recorte do mapa de suscetibilidade a deslizamentos do IBGE.	58
Figura 30. Imagens do satélite GOES-16, no canal infravermelho e realçadas para o período de 23 a 30 de maio de 2017 na CLNEB durante a atuação do sistema precipitante.	59
Figura 31. Campos de ROL ($W m^{-2}$) para o período de 23 a 30 de maio de 2017 na CLNEB durante a atuação do sistema precipitante.	60
Figura 32. Refletividade dos radares meteorológicos de Maceió (a,b,c) e Natal (d) utilizando o produto CAPPI de 3 km para os dias (a) 24/05, (b) 25/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.	61
Figura 33. Campos médios diários de velocidade vertical (sombreado) no nível vertical de 700 hPa ($Pa s^{-1}$) e escoamento médio do vento em linha de corrente no nível de 850 hPa ($m s^{-1}$). As informações correspondem aos dias (a) 23/05, (b) 24/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.	63
Figura 34. Campos médios diários de divergência do vento (sombreado) no nível vertical de 200 hPa ($m s^{-1}$) e escoamento do vento em linha de corrente no nível de 200 hPa. As informações correspondem aos dias (a) 23/05, (b) 24/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.....	63
Figura 35. Campos médios diários de Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado ($Kg m^{-2}s$). As informações correspondem aos dias (a) 23/05, (b) 24/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.	64
Figura 36. Espacialização da chuva diária na CLNEB durante o período de 23 a 26 de maio de 2017. As imagens da letra a até d correspondem a chuva simulada pelo modelo RegCM. As imagens da letra e até h correspondem à chuva estimada pelo satélite TRMM.	65
Figura 37. Espacialização da chuva diária na CLNEB durante o período de 27 a 30 de maio de 2017. As imagens da letra a até d correspondem a chuva simulada pelo modelo RegCM. As imagens da letra e até h correspondem à chuva simulada pelo satélite TRMM.	65
Figura 38. (a) Distribuição do BIAS resultante da análise estatística entre a chuva simulada pelo modelo RegCM e a chuva observada pelo satélite TRMM. (b) Distribuição do RMSE resultante da análise estatística entre a chuva simulada pelo modelo RegCM e a chuva observada pelo satélite TRMM.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características dos principais movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.	6
Quadro 2. Características dos agentes deflagradores dos movimentos de massa.	13
Quadro 3. Frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012.	14
Quadro 4. Limiares de precipitação relacionados à ocorrência de deslizamentos em diferentes cidades brasileiras.	24
Quadro 5. Regionais administrativas de Jabotão dos Guararapes e os seus respectivos bairros.	28
Quadro 6. Informações referentes a definição da precipitação acumulada dos eventos de chuva (E), duração (D) e intensidade (I). A data em vermelho evidencia que neste dia houve ocorrência de deslizamento.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações das estações pluviométricas automáticas do CEMADEN localizadas em Jabotão dos Guararapes.	35
Tabela 2. Parâmetros utilizados na física do modelo RegCM.	40
Tabela 3. Estatísticas descritivas aplicadas para os dados diários de precipitação registrados nas estações pluviométricas de Jabotão dos Guararapes.	51
Tabela 4. Correlação aplicada para as cinco estações pluviométricas em Jabotão dos Guararapes.	52
Tabela 5. Acumulados de precipitação diária (mm) registrados pelos pluviômetros do CEMADEN no período de 24 a 31 de maio de 2017. Valores entre parêntese correspondem aos eventos de deslizamentos.	62

LISTA DE SIGLAS E UNIDADES

SIGLAS

AB – Alta da Bolívia

ABDN – Atlas Brasileiro de Desastres Naturais

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima

CAPPI – *Constant Altitude PPI*

CCMs – Complexos Convectivos de Mesoescala

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

CFUVI – Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado

CLNEB – Costa Leste do Nordeste Brasileiro

COBRADE – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CTGEO – Centro de Tecnologias Geoambientais

DRM – Departamento de Recursos Minerais

DOLs – Distúrbios Ondulatórios de Leste

ECMWF – *European Centre Medium-Term Weather Forecasts*

ENOS – El Niño-Oscilação Sul

GEE – *Google Earth Engine*

GOES – *Geostatioary Operational Environmental Satellite*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW – *Inverse Distance Weighting*

IG – Instituto Geológico

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Landsat – *Land Remote Sensing Satellite*

LIs – Linhas de Instabilidade

MDE – Modelo Digital de Elevação

NEB – Nordeste do Brasil

OMJ – Oscilação Madden Julian

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

POAs – Perturbações Ondulatórias nos Ventos Alísios

PPDC – Planos Estaduais de Proteção e Defesa Civil

PMRR – Plano Municipal de Redução de Riscos

RegCM – *Regional Climate Model*

RMR – Região Metropolitana de Recife

RMSE – *Root Mean Squared Error*

ROL – Radiação de Onda Longa

SCMs – Sistemas Convectivos de Mesoescala

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases Estufa

SFs – Sistemas Frontais

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*

TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UNDRR – *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

UTC – *Coordinated Universal Time*

VCANs – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

UNIDADES

°C – Celsius

cm/ano – centímetro por ano

hPa – Hectopascal

km – Quilômetro

km/h – Quilômetro por hora

Kg m⁻²s – Quilograma por metro quadrado por segundo

m – Metro

m s⁻¹ – Metro por segundo

mm – Milímetro

mm/dia – Milímetro por dia

µm – Micrômetro

% – Uma divisão por cem ou percentual

W m⁻² – Watts por metro quadrado

dBZ – Refletividade por altura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Hipótese.....	3
1.4.1 Objetivo Geral.....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 MOVIMENTO DE MASSA.....	5
2.1.1 Deslizamentos.....	7
2.1.2 Fluxo de detritos.....	10
2.1.3 Queda de blocos.....	11
2.1.4 Fatores relacionados ao movimento de massa.....	12
2.2 SISTEMAS PRECIPITANTES QUE ATUAM NA COSTA LESTE DO NORDESTE.....	16
2.3 RISCO E VULNERABILIDADE SOCIAL A DESASTRES EM JABOATÃO DOS GUARARAPES.....	18
2.4 RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E OS MOVIMENTOS DE MASSA.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	27
3.2 DADOS.....	31
3.3 MÉTODOS.....	32
3.3.1 Levantamento do crescimento urbano na área estudo.....	33
3.3.2 Setores de suscetibilidade e risco à deslizamentos.....	33
3.3.3 Informações sobre deslizamentos e precipitação.....	34

3.3.4 Relação entre precipitação e deslizamentos.....	36
3.3.5 Estudo de caso na CLNEB em maio de 2017.....	38
a. Dados de reanálise.....	38
b. Imagens de satélite.....	39
c. Radar meteorológico.....	39
d. Dados de chuva TRMM.....	39
e. Simulação numérica.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Ocupação urbana e setores de risco a deslizamentos em Jaboaão dos Guararapes.....	41
4.2 Ocorrências de deslizamentos e variabilidade espaço-temporal da chuva em Jaboaão dos Guararapes.....	43
4.3 Relação dos dados pluviométricos e as ocorrências de deslizamentos.....	50
4.4 Estudo de caso - maio de 2017.....	58
4.4.1 Análise da chuva via modelagem numérica	65
5. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS.....	70
ANEXOS.....	84

1. INTRODUÇÃO

As análises voltadas para as consequências das mudanças climáticas apontam para uma tendência de que poderá haver um aumento no número de eventos geo-hidrológicos em diversas áreas suscetíveis, principalmente nas regiões com grande densidade populacional (ÁVILA *et al.*, 2016; PMBC, 2016). Por isso, torna-se relevante entender quais os agentes causadores desses eventos para mitigar os seus efeitos, que podem se apresentar na forma de inundações e movimentos de massa.

Os eventos de movimentos de massa registrados no Brasil, apresentados no Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (ABDN) (CEPED, 2013), demonstram a necessidade de melhorar a capacidade de monitoramento, previsão e emissão de alertas de eventos geo-hidrológicos, a fim de minimizar os prejuízos relacionados e proteger vidas humanas. Para diminuir este impacto, a comunidade científica tem elaborado estudos eficazes, comumente ligados ao conhecimento de seus mecanismos desencadeadores, com o intuito de auxiliar no sistema de monitoramento e reduzir os riscos de desastres socioambientais (GARIANO *et al.*, 2015; NAIDU *et al.*, 2018). De acordo com a terminologia adotada pela *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR), o risco de desastre compreende a perda potencial de vidas ou bens materiais que podem ocorrer a um sistema, sociedade ou comunidade em um período específico de tempo, determinado probabilisticamente em função do perigo, exposição, vulnerabilidade e capacidade (UNISDR, 2009).

Dentre os agentes desencadeadores dos movimentos de massa, podem ser citados os agentes predisponentes que são aqueles associados às características naturais dos terrenos e os agentes efetivos que são diretamente responsáveis pela deflagração da instabilidade das encostas (GUIDICINE & NIEBLE, 1984). A precipitação tem um impacto determinante como agente deflagrador, pois pode influenciar nos processos de instabilidade em uma encosta contribuindo com o aumento da poropressão, que faz reduzir a resistência ao cisalhamento do solo (SELBY, 1993). Deste modo, a atuação da precipitação com intensidade ou duração suficientes pode provocar graves consequências sobre o meio físico, principalmente em áreas urbanas.

No Brasil, a chuva é um dos principais agentes deflagradores de eventos adversos de origem geo-hidrológica, onde grande parte dos eventos envolvendo vítimas está

relacionada aos movimentos de massa (CARMO & ANAZAWA, 2014; TOMINAGA, 2015). Para estabelecer uma relação entre a precipitação e os movimentos de massa, pesquisas científicas estão sendo desenvolvidas utilizando o método de correlação entre chuva e deslizamento a partir de limiares críticos de precipitação que são úteis em sistemas de alerta operacional (SEGONI *et al.*, 2014; MARCHEZINI *et al.*, 2020).

Os sistemas de alerta operacional referem-se ao conjunto de capacidades necessárias para gerar e disseminar informações de alerta oportunas e significativas para permitir que indivíduos, comunidades e organizações ameaçadas por um perigo se preparem e ajam de forma adequada e em tempo suficiente para reduzir a possibilidade de dano ou perda (UNISDR, 2009). Assim, analisar os acumulados de precipitação em um determinado período de tempo podem definir o limiar necessário para deflagrar os processos de ruptura do solo (BANDEIRA & COUTINHO, 2015; MENDES *et al.*, 2015; DAMASCENO & CARDOSO, 2018; METODIEV *et al.*, 2018).

1.2 Justificativa

Os desastres associados as ameaças naturais observadas no Brasil tiveram um aumento significativo a partir da década de 2000, sendo os eventos por movimentos de massa os que mais contribuíram para esse crescimento (CEPED, 2013). Segundo dados publicados pelo Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016), entre 2008 e 2012, a região Nordeste do Brasil (NEB) apresentou um número total de 14.020 ocorrências de movimentos de massa com 173 municípios atingidos, sendo responsável por 50% dos eventos comparado com as outras regiões brasileiras. De acordo com o PBMC (2016), o estado do NEB com maior número de ocorrências registradas foi Pernambuco, com 5.910 ocorrências.

Um estudo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), mostrou que o NEB apresenta grande exposição a riscos de desastres relacionados a movimentos de massa, sendo identificadas 5.471 áreas de risco com 2.952.628 pessoas vivendo em situação de vulnerabilidade em 294 municípios. Somente no Estado de Pernambuco foram avaliadas 2.147 áreas de risco, o que representa 39,2% do total de áreas de risco dos nove Estados da região. Segundo a UNISDR (2009), a vulnerabilidade está relacionada com as características e circunstâncias de uma comunidade, sistema ou grupo que o tornam suscetível aos efeitos prejudiciais de uma ameaça.

Ainda de acordo com IBGE (2018), Recife e Jaboatão dos Guararapes apresentaram as maiores taxas de população exposta à riscos de desastres no Estado de Pernambuco com 206.761 e 188.026 habitantes em áreas de risco, respectivamente. A exposição de pessoas ao risco está associada a forma desordenada de ocupação do solo através da instalação de construções e facilidades em encostas íngremes, topos de morro e margens de corpos d'água na Região Metropolitana de Recife (RMR) (CEPED, 2013).

Em Pernambuco, a maior concentração de movimentos de massa é observada entre os meses de abril a julho, coincidindo com o período mais chuvoso da região leste do Estado (CEPED, 2013). Embora a RMR, não tenha registrado um grande número de fatalidades em um único evento de chuva, a região tem um histórico de desastres relacionados a movimentos de massa durante o período chuvoso ao longo dos anos (BANDEIRA & COUTINHO, 2015).

Marchezini *et al.* (2017) destacam a importância da obtenção de parâmetros pluviométricos capazes de desencadear movimentos de massa, que auxiliam os municípios nas ações de gestão das áreas de risco. Considerando a vulnerabilidade do município pernambucano de Jaboatão dos Guararapes, torna-se relevante compreender a relação existente entre a chuva e os movimentos de massa para contribuir com medidas de redução do risco de desastres relacionados com deslizamentos neste município.

1.3 Hipótese

A hipótese levantada é a de que sistemas meteorológicos são uma das principais causas de movimentos de massa no Brasil e aprofundar as relações entre os agentes desencadeadores e os movimentos de massa amplia a melhoria de previsibilidade deste tipo de ameaça. Sendo o acumulado de precipitação uma das causas presentes na maioria dos eventos de movimentos de massa, sua análise é de extrema importância para o desenvolvimento de medidas não-estruturais.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é relacionar a precipitação com as ocorrências de deslizamentos no município de Jaboatão dos Guararapes, decorrentes de precipitações

diárias e acumuladas no período de 2016 a 2020, bem como identificar as áreas mais afetadas pelas ocorrências de deslizamento no município.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Identificar as áreas suscetíveis e os setores de risco usando os dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) na escala de 1:150.000 e 1:100.000, bem como analisar os dados de uso e ocupação do solo de anos anteriores (1985, 1995, 2005, 2015) do MAPBIOMAS para verificar a evolução do processo antrópico no município.
- b) Analisar as ocorrências de deslizamentos e precipitação quanto à variabilidade temporal (2016-2020) e espacial.
- c) Avaliar os dados de precipitação diária e precipitação acumulada antecedente para os dias com ocorrências de deslizamentos, visando encontrar parâmetros capazes de desencadear deslizamentos.
- d) Analisar um evento extremo de chuva através de parâmetros meteorológicos que deflagraram ocorrências de deslizamentos em várias cidades da Costa Leste do Nordeste em maio de 2017, assim como avaliar a habilidade de um modelo numérico regional (RegCM) versão 4.7 em representar a chuva desse evento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção visa apresentar a conceituação teórica referente aos aspectos gerais com relação aos movimentos de massa, descrevendo suas principais características e tipologias mais comuns registradas no Brasil, abordando as classificações dos processos, suas causas e os agentes deflagradores. Posteriormente, apresenta a discussão sobre os sistemas precipitantes que atuam na CLNEB. Além disso, são expostos conceitos sobre desastres, suscetibilidade, vulnerabilidade e risco, com ênfase ao município de Jaboaão dos Guararapes. Ao final, são abordados estudos que fazem referência a relação entre precipitação e deslizamentos.

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Várias definições sobre os termos de movimentos de massa são encontradas na literatura abordando os principais mecanismos envolvidos na sua ocorrência. A primeira definição no meio científico foi proposta por Varnes (1978), como o deslocamento dos materiais que formam as encostas, incluindo rocha, solo e/ou vegetação, no sentido para baixo e para fora da encosta sob a influência da gravidade. Segundo o autor, os movimentos podem ser potencializados através de um agente deflagrador como a água, o gelo e a neve ocasionando um tipo de movimento de massa específico que podem ser classificados como queda, tombamento, deslizamento, espalhamento e corrida/escoamento, para os tipos de materiais: rocha, solo e detritos.

De modo geral, os movimentos de massa são classificados com base no tipo de processo, material mobilizado, no conteúdo de água no solo e na velocidade de movimento (CRUDEN & VARNES, 1996). Uma classificação de movimentos de massa envolvendo as principais características como a velocidade e mecanismo do movimento, tipo de material e geometria da massa mobilizada, foi proposta por Augusto Filho (1992), a qual é bastante utilizada em manuais técnicos e publicações para fins de mapeamento de áreas suscetíveis no território brasileiro (Quadro 1).

A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) agrupa os desastres de origem geológica em quatro tipos: a) quedas, tombamentos e rolamentos de rocha; b) deslizamentos de solo e/ou rocha; c) corridas de massa e d) subsidências e colapsos (CENAD, 2013).

Quadro 1. Características dos principais movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira.

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo ou Fluência	<ul style="list-style-type: none"> -Vários planos de deslocamento (internos); -Velocidades de variando de muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade; -Movimentos constantes, sazonais e intermitentes; -Solo, depósitos, rocha fraturada/alterada; -Geometria indefinida;
Deslizamentos	<ul style="list-style-type: none"> -Poucos planos de deslocamento (externos); -Velocidades de médias (km/h) a altas (m/s); -Pequenos a grandes volumes de material; -Geometria e materiais variáveis; -Planares: solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; -Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; -Em cunha: solos/rochas com dois planos de fraqueza;
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> -Sem planos de deslocamento; -Queda livre ou rolamento através de plano inclinado; -Velocidades muito altas (m/s); -Material rochoso; -Pequenos e médios volumes; -Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc; -Rolamento de matacão e tombamento;
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> -Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); -Movimentos semelhantes a um líquido viscoso; -Desenvolvimento ao longo das drenagens; -Velocidades médias a altas; -Mobilização de solo, rochas, detritos e água; -Grandes volumes de material; -Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas;

Fonte: AUGUSTO FILHO (1992).

A definição da tipologia tem grande importância para análises de suscetibilidade que contribuem para a indicação de áreas propensas ao desenvolvimento de processos do meio físico que podem gerar desastres, em face da presença de fatores predisponentes básicos em terrenos ocupados (IPT, 2014). O Brasil é considerado muito suscetível aos movimentos de massa devido aos condicionantes naturais e antrópicos, sendo mais comum os deslizamentos planares, os deslizamentos rotacionais, os fluxos de detritos e as quedas dos blocos.

2.1.1 Deslizamentos

Dentre os movimentos de massa que impactam o Brasil, os deslizamentos são os mais recorrentes. Este tipo de movimento é de grande importância em função da sua interferência na evolução das encostas e pelas implicações socioeconômicas associadas ao seu impacto (IPT, 2007). Os deslizamentos são geralmente deflagrados por eventos de chuva de alta intensidade ou com elevados índices pluviométricos acumulados, condicionados por fatores predisponentes intrínsecos ao terreno.

Tominaga (2015) descreve os deslizamentos como movimentos rápidos, de porções de terrenos (solos e rochas), deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da vertente. Talude é um termo genérico, compreendendo uma superfície inclinada que limita um maciço de solo, de rocha ou ambos, sendo de origem natural (encostas e vertentes) ou artificial, quando construído pelo homem através de aterros e cortes (FIORI, 2015).

Deslizamento, também chamado de escorregamento, é o movimento de massa, solo ou rocha caracterizado por alta velocidade, que se desenvolve comumente em encostas com declividade e amplitude média a alta, através de uma superfície de ruptura planar (translacional), circular (rotacional) ou em cunha (TOMINAGA, 2015).

As tipologias mais frequentes no Brasil são os deslizamentos planares (ou translacionais), que normalmente ocorrem em encostas com solos pouco espessos e jovens, geralmente encontradas em regiões de relevo escarpados ou acidentados (TOMINAGA, 2007). Nos deslizamentos planares, o material em movimento apresenta grande deformação, a massa se rompe por cisalhamento e progride sobre uma superfície plana (Figura 1). Desenvolvem-se durante ou logo após intensos episódios de chuva, onde a chuva age na superfície das encostas e as rupturas ocorrem em um curto espaço de tempo (FERNANDES & AMARAL, 2010).

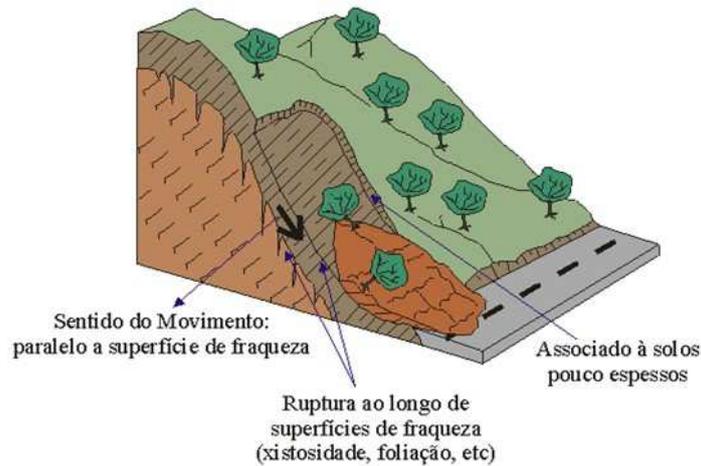


Figura 1. Esquema ilustrativo de um deslizamento planar ou translacional. Fonte: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html>> Acesso em: 12 ago. 2019.

A ruptura normalmente se dá por planos de fraqueza preexistentes associados às heterogeneidades geológicas, geotécnicas ou hidrológicas do maciço. Esses planos de fraqueza são resultantes de falhas, juntas, fraturas e por condicionantes geomorfológicas e/ou pedológicas (FERNARDES & AMARAL, 2010). Os deslizamentos planares caracterizam-se por apresentar rápido deslocamento de materiais, os quais ocorrem em solos pouco desenvolvidos em vertentes com altas declividades (Figura 2), podendo atingir centenas de metros.



Figura 2. Deslizamento planar de solo em Guaratinguetá, SP. Fonte: IPT/CTGEO.

O deslizamento circular (ou rotacional) é um tipo de movimento em que a superfície da ruptura é curvada no sentido superior (em forma de colher) e o movimento da queda é mais ou menos rotatório em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008). São movimentos mais lentos que os planares e

ocorrem de maneira contínua ou intermitente, por meio de uma ou mais superfícies de ruptura curvas, com concavidade voltada pra cima (Figura 3).

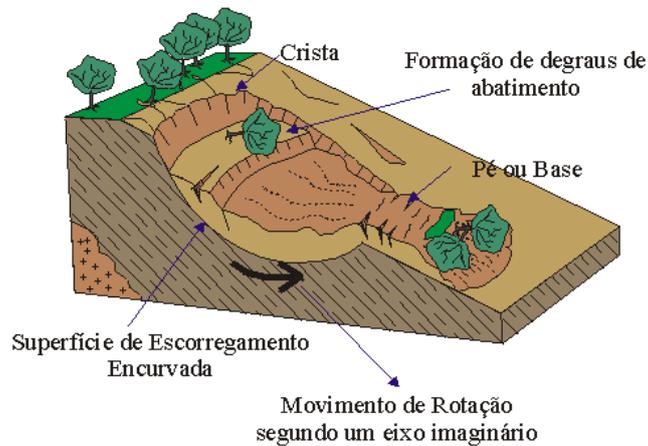


Figura 3. Esquema ilustrativo de um deslizamento circular ou rotacional. Fonte: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>> Acesso em: 12 ago. 2019.

De acordo com Varnes (1978) quando a superfície de ruptura se desloca do topo (crista) até a base do talude, a massa instável tende a restaurar seu equilíbrio, isto porque a quantidade de movimento decresce e a massa deslizada cessa o movimento. Após o movimento, é possível perceber a formação de degraus de abatimento. Geralmente, este tipo de deslizamento ocorre em encostas com espessos pacotes homogêneos de solo, rochas sedimentares ou maciços rochosos intensamente fraturados (Figura 4) e tem como início a erosão causada pela chuva na base dos taludes e cortes feitos em encostas.



Figura 4. Deslizamento rotacional de solo em Rio Claro, RJ. Fonte: Thiago Dutra, 2016.

Os deslizamentos em cunha estão associados aos maciços rochosos pouco ou muito alterados, onde a existência de dois planos de fraqueza desfavoráveis à estabilidade pode condicionar o movimento ao longo da linha de intersecção das superfícies de ruptura

(Figura 5). Estes processos são mais comuns em taludes de cortes e encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (TOMINAGA, 2015).

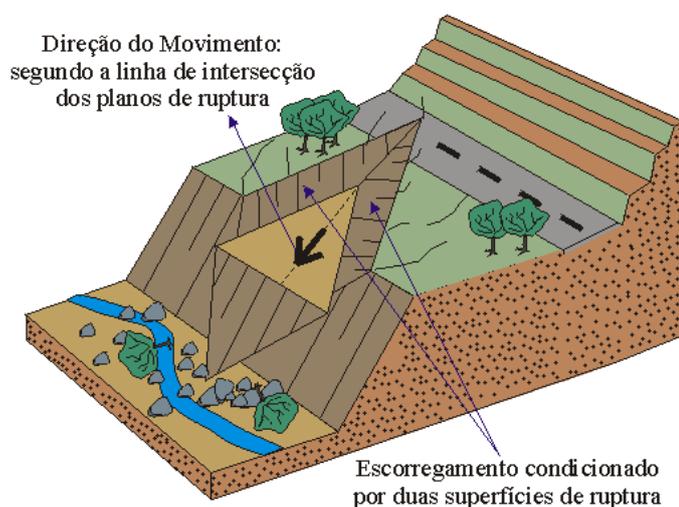


Figura 5. Esquema ilustrativo de um deslizamento em cunha. Fonte: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html>> Acesso em: 12 ago. 2019.

2.1.2. Fluxos de detritos

De acordo com Highland & Bobrowsky (2008), o fluxo de detritos é definido como uma forma rápida de movimento de massa, em que o solo solto e rochas, e por vezes, material orgânico, se misturam à água e formam a lama que escoam por talude abaixo (Figura 6a). Este processo pode ser iniciado em áreas de relevo montanhoso, durante intensos episódios pluviométricos, a partir do carregamento de sedimentos provenientes de deslizamentos recentes e/ou da remobilização de antigos depósitos sedimentares acumulados ao longo dos canais de drenagem (Figura 6b).

Os materiais mobilizados podem alcançar áreas planas e distantes situadas à jusante. Por sua alta energia de escoamento e elevada concentração de sólidos, bem como por seu amplo raio de alcance, configura um movimento de massa com potencial impacto destrutivo (IPT, 2014). Quando atinge áreas urbanas, esse fenômeno pode causar intensos impactos econômicos e sociais, inclusive a perda de vida humana (GRAMANI, 2015).



Figura 6. a) Esquema ilustrativo de um fluxo de detritos. b) Bacia de drenagem afetada por fluxo de detritos em Itaoca, SP. Fonte: Rafael Ribeiro, 2016; Foto: IPT/CTGEO.

2.1.3 Queda de blocos

Yilmaz *et al.* (2008) definem a queda de blocos rochosos como todo o movimento de massa em que um ou mais blocos desconexos do maciço rochoso caem ao longo de um declive por queda livre, saltação ou rolamento (Figura 7a). Tem como principais fatores predisponentes as discontinuidades litológico-estruturais dos maciços rochosos e a ação do intemperismo físico-químico, podendo ser deflagrado por eventos chuvosos (IPT, 2014).

A principal característica que diferencia a queda de blocos dos outros movimentos de massa é a alta mobilidade do material (CPRM, 2018). A velocidade, a trajetória e o alcance podem variar muito dependendo da declividade da encosta, e da forma e dimensão do material mobilizado. Segundo Ribeiro (2013), a queda de blocos é um tipo muito frequente de movimento de massa em regiões montanhosas e, quando atingem zonas habitadas, é uma das principais causas de danos e fatalidades (Figura 7b).

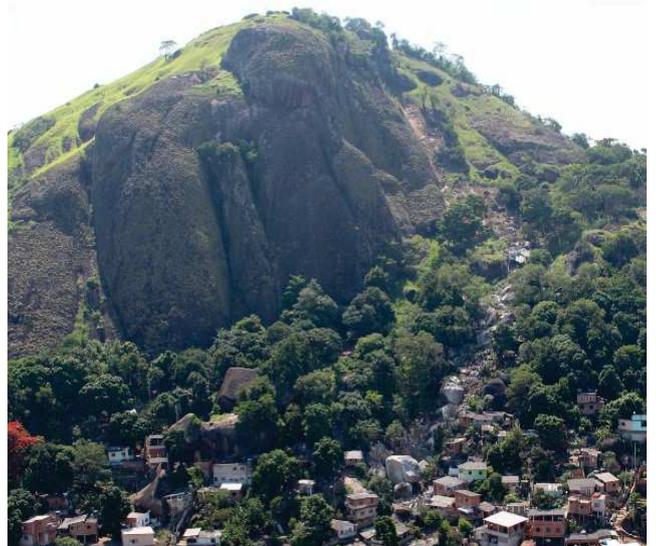
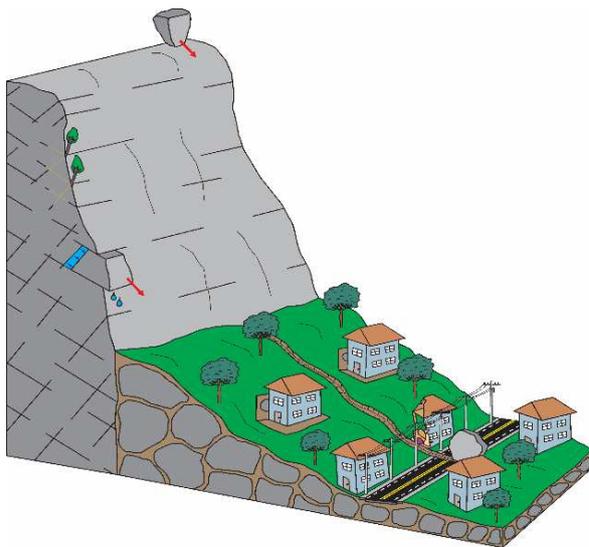


Figura 7. a) Esquema ilustrativo de uma queda de blocos. b) Área afetada por queda de blocos no Espírito Santo. Fonte: Rafael Ribeiro, 2016; Foto: Defesa Civil do Espírito Santo, 2016.

2.1.4 Fatores relacionados aos movimentos de massa

A maioria dos movimentos de massa ocorre sob influência de condicionantes naturais, antrópicos ou por uma combinação de ambos (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008). Os condicionantes naturais podem ser separados em dois grupos, agentes predisponentes e efetivos (Quadro 2). Segundo o IPT (2007), os agentes predisponentes são o conjunto das características intrínsecas do meio físico natural, relacionadas aos complexos geológicos, geomorfológicos, hidrológico-climático e a vegetação. O segundo grupo que compreende os fatores efetivos são elementos diretamente responsáveis pela deflagração dos movimentos, sendo estes subdivididos em preparatórios e imediatos, os quais abrangem as chuvas e a influência antrópica.

Os agentes efetivos variam muito e dependem de fatores como a declividade da encosta, morfologia ou forma do terreno, o tipo de solo, a geologia subjacente e se há pessoas ou estruturas sobre a zona afetada. Cruden & Varnes (1996) relacionaram os principais fatores que contribuem para os movimentos de massa a partir de condicionantes geológicos, morfológicos, físicos e antrópicos. Para esses autores, alguns desses fatores estão ligados a permeabilidade do solo e seus efeitos na poropressão em função das chuvas, remoção da vegetação por erosão ou desmatamento.

Quadro 2. Características dos agentes deflagradores dos movimentos de massa.

Agentes deflagradores	Agentes predisponentes	Agentes	Características	
		Geológico	Características da rocha e intemperismo; Estruturas geológicas; Tectonismo	
		Pedológico	Propriedades mecânicas dos solos; Propriedades químicas, mineralógicas e texturas dos solos	
		Geomorfológico	Declividade; Amplitude; Formas da encosta (retilínea, convexa e côncava); Relação entre a declividade e a espessura do solo	
		Hidrológico	Densidade de drenagem; Presença de vegetação; Influência no ciclo hidrológico; Comportamento das raízes	
	Agentes efetivos	Agentes	Preparatórios	Imediatos
		Meteorológico	Precipitação acumulada	Intensidade da precipitação instantânea
		Hidrológico	Infiltração; Fluxos sub-superficiais; Poropressão da água	Escoamento superficial
		Antrópico	Uso e ocupação do solo; Retirada da vegetação; Intervenções nas encostas (corte, aterros, concentração de águas servidas)	

Fonte: Guidicine & Nieble (1984).

A precipitação e sua distribuição espacial e temporal são processos importantes na atuação da água no solo, sendo, uma das principais causas para a instabilidade de encostas e taludes. No solo, a água da chuva tem contribuição na redução da resistência dos materiais, que pode também ser resultante de processos associados ao intemperismo e por forças atuantes no solo (AUGUSTO FILHO *et al.*, 2017).

No Brasil, o principal agente deflagrador de movimentos de massa são as chuvas, de modo que os grandes acidentes envolvendo vítimas fatais relacionados aos movimentos de massa ocorreram durante o período chuvoso, que pode variar de região para região.

De acordo com os dados do ABDN (CEPED, 2013), a maior quantidade de registros de movimentos de massa no Brasil ocorridos no período entre 1991 a 2012 foi observada nos meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março, com destaque para a região sudeste onde o número de casos corresponde a 90% (Quadro 3) do total mensal para o país nos meses de verão, que é a estação chuvosa da região.

Quadro 3. Frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012.

Movimento de massa	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Janeiro	0	1	0	215	14	230
Fevereiro	1	4	0	95	25	125
Março	0	1	0	42	5	48
Abril	1	6	0	22	7	36
Mai	2	7	0	3	1	13
Junho	0	7	0	3	5	15
Julho	0	2	0	4	11	17
Agosto	0	3	0	5	7	15
Setembro	2	1	0	2	7	12
Outubro	0	3	0	11	8	22
Novembro	1	0	0	53	1	55
Dezembro	0	1	1	103	4	109

Fonte: Adaptado de CEPED (2013).

Em termos de frequência anual de movimentos de massa ocorridos no Brasil de 1991 a 2012, observa-se uma tendência de aumento ao longo dos anos, com destaque para

os anos de 2010 e 2011 (Figura 8). A frequência e a intensidade dos eventos extremos de precipitação estão relacionadas com a variabilidade climática natural, ligada a eventos de El Niño e La Niña, assim como a partir de variações de sistemas meteorológicos que podem causar intensa precipitação (GRIMM & TEDESCHI, 2009; PBMC, 2014a).

No caso de 2010 e 2011, tem-se que em dezembro e janeiro foram observados eventos extremos de precipitação no Rio de Janeiro associados a condição de La Niña na região equatorial do Pacífico, Temperatura da Superfície do Mar (TSM) acima da média nos oceanos Atlântico Norte e Sul e atuação de episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (CLIMANÁLISE, 2021). Nesses eventos foram observados acumulados significativos de chuva que causaram deslizamentos e inundações, com registro de fatalidades nas áreas serranas do Rio de Janeiro.

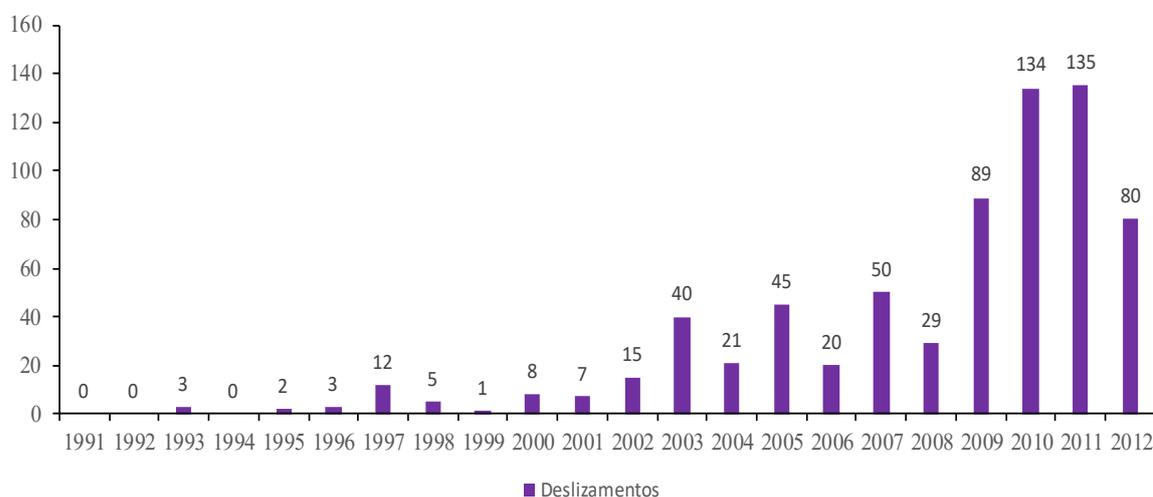


Figura 8. Frequência anual de movimentos de massa ocorridos no Brasil no período de 1991 a 2012. Fonte: Adaptado de CEPED (2013).

A região NEB também é afetada por movimento de massa nos meses chuvosos. No segundo trimestre de 2020 (abril, maio e junho) foram registrados 59 eventos de movimentos de massa no Brasil, sendo 46 destes observados na região Nordeste (CEMADEN, 2020), onde a maioria dessas ocorrências estavam localizadas na CLNEB.

Os movimentos de massa têm sido responsáveis por grande número de vítimas fatais e prejuízos materiais, com destaque para os desastres ocorridos em 1967, na Serra das Araras (RJ) e Caraguatatuba (SP), que resultaram em 1.320 mortes e destruição de várias moradias (AUGUSTO FILHO, 1994).

Como os índices pluviométricos são de extrema relevância para que ocorram movimentos de massa no Brasil, faz-se necessário compreender quais são os sistemas

meteorológicos responsáveis por intensificar as condições atmosféricas de uma determinada região. Considerando os avanços na qualidade da previsão meteorológica no país, tais sistemas meteorológicos tendem a ser previstos com mais precisão e antecipação, melhorando o monitoramento e envio de alertas de risco de movimentos de massa (IDE, 2005).

2.2 SISTEMAS PRECIPITANTES QUE ATUAM NA COSTA LESTE DO NORDESTE

Durante a década de 1970 houve o desenvolvimento de pesquisas científicas com interesse em estudar os sistemas meteorológicos atuantes na CLNEB, tendo como exemplo os trabalhos pioneiros de Strang (1972) e Kousky (1979), que verificaram uma porcentagem de 50% da precipitação anual nos meses de maio a julho. Posteriormente, Rao *et al.* (1993) adotaram o período de abril a julho como a estação chuvosa da CLNEB.

Os principais sistemas capazes de gerar máxima precipitação nos meses de abril a julho na CLNEB são atribuídos a propagação de nuvens convectivas para oeste (GOMES *et al.*, 2019), conhecidas como Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs). Com maior atuação geralmente no Estado da Bahia, os Sistemas Frontais (SFs) podem alcançar as latitudes mais baixas e produzir convecção organizada no inverno do Hemisfério Sul (MARENGO *et al.*, 2018). Outros autores sugerem que os elevados valores de precipitação no litoral do Nordeste Brasileiro (NEB) estão associados à convecção da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), aos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), aos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e à máxima convergência dos alísios com a brisa terrestre em diferentes épocas do ano (RODRIGUES *et al.*, 2019; REPINALDO *et al.*, 2020; LYRA *et al.*, 2020).

DOLs são conhecidos como distúrbios que se movem para oeste, associados a perturbações no campo de vento na baixa e média troposfera, que se manifestam próximo da CLNEB durante o final do outono e inverno austral (MACHADO *et al.*, 2009). Alguns estudos sugerem que os distúrbios se desenvolvem devido ao prolongamento para o equador de um cavado de latitudes médias com características de velocidade de propagação, comprimento de onda e período de atuação associados aos ventos alísios (YAMAZAKI & RAO, 1977; FEDOROVA, 2008). Este sistema pode provocar eventos extremos de chuva, como foi o caso da ocorrência de um evento de DOL ocorrido em junho de 2014 no estado do Rio Grande do Norte, que causou valores significativos de chuva e bastantes transtornos para cidade de Natal (NEVES *et al.*, 2016).

Um sistema meteorológico típico que afeta as condições de tempo na CLNEB são os SFs, que são caracterizados por bandas de nuvens organizadas que se formam na região de confluência entre uma massa de ar frio (mais densa) com uma massa de ar quente (menos densa), podendo provocar chuvas na região sul, leste e centro-sul do NEB (CAVALCANTI & KOUSKY, 2009; CORREIA FILHO *et al.*, 2019). Apesar de serem menos frequentes no verão, as frentes frias podem interagir com a convecção tropical, além de influenciar na manutenção da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e assim causar excesso de precipitação, inundações e deslizamentos de encostas sobre a CLNEB (FEDOROVA *et al.*, 2016).

Os VCANs são sistemas da escala sinótica caracterizados por um centro de baixa pressão com núcleo frio localizados na alta troposfera (dos REIS *et al.*, 2021). Eles se originam a partir do cavado do NEB localizado nos altos níveis atmosféricos, que ao se fechar em uma circulação ciclônica, favorece a convergência de massa na superfície por meio dos movimentos verticais ascendentes na sua borda, que são compensados pelos movimentos subsidentes no seu centro (FERREIRA & SOUZA, 2019). No NEB, os efeitos do VCANs sobre os acumulados de precipitação são bastante visíveis quando estão relacionados à circulação da Alta da Bolívia (AB) e a ZCAS. Em geral, a atuação desse sistema atmosférico pode durar até 4 dias com maior predominância na primavera e verão em grande parte do NEB (MORAIS *et al.*, 2015).

Sobre o Atlântico tropical, a ZCIT é considerada o principal sistema precipitante que afeta o NEB, em especial a parte do centro e norte da região. É caracterizada por uma banda de nuvens convectivas com orientação na direção leste-oeste sobre a região equatorial, onde ocorre a convergência dos alísios de nordeste no Hemisfério Norte e sudeste no Hemisfério Sul (MELO *et al.*, 2009, UTIDA *et al.*, 2019). Sua migração é determinada pelo aquecimento das águas superficiais do Oceano Atlântico Tropical, dessa forma, a ZCIT atinge sua posição mais ao sul no outono (março-maio) do Hemisfério Sul (HOUNSOU-GBO *et al.*, 2015; NICHOLSON, 2018). Assim, seu deslocamento tem papel importante nos máximos pluviométricos registrados no norte do NEB.

Em uma escala espacial menor, outros mecanismos estão diretamente relacionados com as chuvas na CLNEB, como a formação de uma zona de convergência na costa litorânea do NEB, Perturbações Ondulatórias ao longo dos alísios (POAs) provenientes do Atlântico Tropical Sul, Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) organizados

como Linhas de Instabilidade (LIs) e a convergência de umidade em baixos níveis na atmosfera associada a brisa terrestre (ALVES *et al.*, 2017; OLIVEIRA & OYAMA, 2019).

Sistemas dinâmicos de grande escala devido ao acoplamento oceano-atmosfera do Oceano Pacífico Tropical, também são responsáveis pelas variações interanuais da precipitação no NEB, sendo o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) o mecanismo que se manifesta com mais evidência através das anomalias de precipitação (de AZEVEDO *et al.*, 2018). O efeito do ENOS é destacado principalmente no setor norte do NEB, em que as anomalias negativas (positivas) de precipitação são associadas a episódios de El Niño (La Niña) (KAYANO *et al.*, 2013). Em escala interanual, o regime de chuva no NEB também é influenciado pelas anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico (setores norte e sul) e na escala intrasazonal pela Oscilação Madden-Julian (OMJ) (POLZIN & HASTENRATH, 2014; VALADÃO *et al.*, 2017; VASCONCELOS JUNIOR *et al.*, 2018).

2.3 RISCO E VULNERABILIDADE SOCIAL A DESASTRES EM JABOATÃO DOS GUARARAPES

No contexto de mudanças climáticas existem várias razões para considerar que a região NEB está exposta e vulnerável ao risco de desastres relacionados às condições hidrometeorológicas adversas. De acordo com UNISDR (2009), os desastres são definidos como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou sociedade em qualquer escala devido a eventos perigosos que interagem com condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade, levando a um ou mais dos seguintes cenários: perdas e impactos humanos, econômicos, materiais e ambientais.

Os desastres que ocorrem no NEB são, na sua maioria, relacionados a eventos de origem atmosférica, associados com a precipitação em excesso ou escassez (MOURA *et al.*, 2016; COMIN *et al.*, 2021). Sobre a CLNEB, os movimentos de massa constituem, juntamente com os alagamentos e inundações, um dos desastres que se apresentam favoráveis em períodos chuvosos na região (MARQUES *et al.*, 2018).

Para analisar o impacto dos movimentos de massa, faz-se necessário conhecer fatores associados à suscetibilidade, vulnerabilidade e risco. A suscetibilidade está relacionada com a maior ou menor propensão de instabilidade do solo, decorrente de processos predisponentes naturais (características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, etc.), representando a fragilidade do ambiente (VENANCIO *et al.*, 2013).

Segundo Fell *et al.* (2008), a vulnerabilidade se refere ao grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área afetada pelo movimento de massa (predisposição de pessoas e/ou construções a serem afetadas por ocasião de um desastre).

O risco é uma medida que relaciona a possibilidade de ocorrência de um fenômeno com a magnitude de danos ou prejuízos causados a pessoas, propriedades ou meio ambiente, expressa em termos de probabilidade e gravidade (FELL *et al.*, 2008). Assim, o risco é estimado pelo produto da probabilidade de um fenômeno vezes as consequências (UNISDR, 2009). Levando em consideração esses fatores, foi possível identificar que muitas pessoas estão sujeitas a sofrerem danos humanos e materiais no Estado de Pernambuco, pois o Estado apresenta diversas áreas suscetíveis à ocorrência de fenômenos naturais ou induzidos dentro da zona urbana (IBGE, 2018).

Os principais problemas associados aos movimentos de massa encontrados no Estado de Pernambuco estão relacionados com suas características geológicas e pelo uso e ocupação do solo. A formação geológica Barreiras presente na faixa costeira de Pernambuco, principalmente na RMR, é composta por sedimentos areno-siltico-argilosos intercalados por lentes de argila e níveis lateríticos, formando morros, morrotes e pequenos tabuleiros com altitudes que alcançam até 50 m e nas bordas formam encostas de fortes declividades, comumente superiores a 30° (CPRM, 2003). Essa formação geológica, também, é caracterizada pela marcante ocupação antrópica que induzem a processos de desestabilização.

A modificação das encostas para a construção de moradias e a remoção da cobertura vegetal tem contribuído para aumentar à suscetibilidade das encostas a ocorrência de movimentos de massa, aumentando assim a exposição das pessoas ao risco de desastres (IPT, 2007). Desse modo, a combinação de processos naturais e induzidos pelas ações humanas pode potencializar os riscos existentes em áreas densamente povoadas.

Segundo IBGE (2018), Jaboatão dos Guararapes, localizada na RMR, é considerada a sexta cidade com maiores números de moradores com residências particulares em áreas de risco a movimentos de massa, inundações e enchentes no Brasil, e onde 29,2% da sua população foi capaz de experimentar algum tipo de desastre. Atualmente, o município de Jaboatão dos Guararapes conta com 194 setores de risco alto a muito alto, sendo 178 relacionados a movimentos de massa de acordo com o último mapeamento de risco realizado pela CPRM (CPRM, 2019).

Nestes setores estão indicados os bairros e ruas onde estão localizados (Figura 9), a tipologia do movimento de massa, quantidade de pessoas em risco, quantidade de imóveis em risco, grau de risco (alto ou muito alto), além de informações que mostram evidências de instabilidade. Devido às condições existentes nesses locais (trincas no solo, degraus de abatimento no talude, cicatrizes de deslizamento, etc.), é possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas (CPRM, 2019).

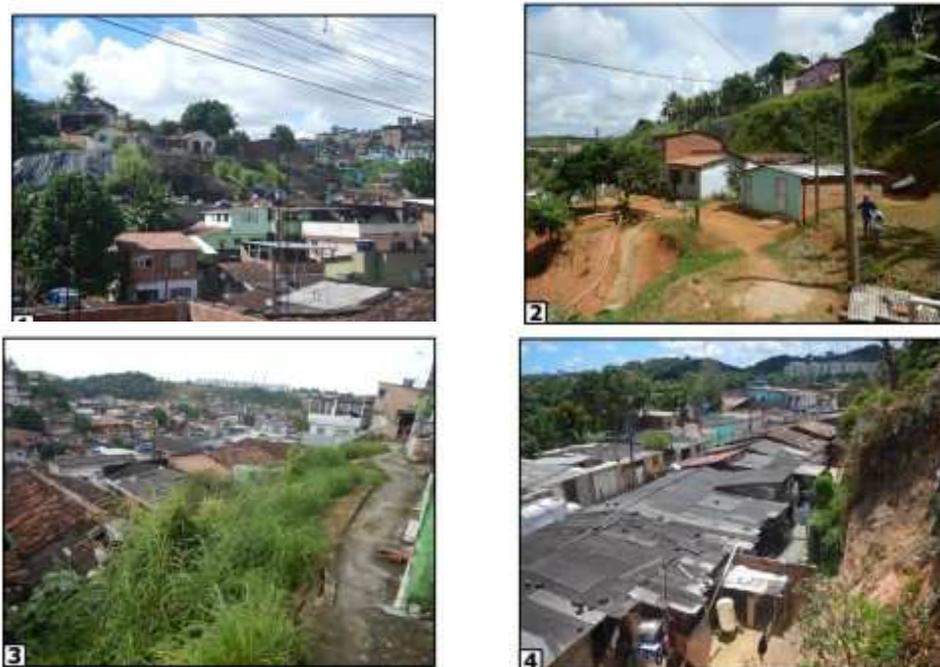


Figura 9. Residências construídas em áreas de riscos sujeitas a eventos de deslizamentos na cidade de Jaboaão dos Guararapes, Pernambuco. 1 – Centro, 2 – Engenho Velho, 3 – Cavaleiro, 4 – Curado. Fonte: CPRM.

O município de Jaboaão dos Guararapes apresenta histórico de movimentos de massa em encostas de acordo com dados da Defesa Civil (DEFESA CIVIL, 2011), sendo os deslizamentos a tipologia observada com mais frequência. Entre os anos de 2006 e 2010 foram observadas mais de 1.000 ocorrências relacionadas a deslizamentos no município (Figura 10), sendo a maioria observada no ano de 2009 e 2010. Após sucessivos desastres ocorridos na cidade foram elaboradas medidas de prevenção ou mitigação dos riscos, dentre elas, a criação do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) que propôs medidas estruturais e não estruturais para cada setor de risco alto e muito alto, tais como obras de engenharia (obras de contenção e drenagem) com o objetivo de evitar a infiltração da água durante chuvas prolongadas (DEFESA CIVIL, 2011).

Além disso, outros autores sugerem que medidas não-estruturais devem ser implementadas no cenário local para reduzir os níveis de risco existentes e proteger a população por ocasião da ocorrência de desastres (MARCHEZINI *et al.*, 2017; COUTINHO *et al.*, 2020). Neste caso, um indicador bastante válido para medidas de planejamento e gestão está na análise de limiares críticos de precipitação, capazes de desencadear movimentos de massa que contribuem com o sistema de alerta antecipado do município.

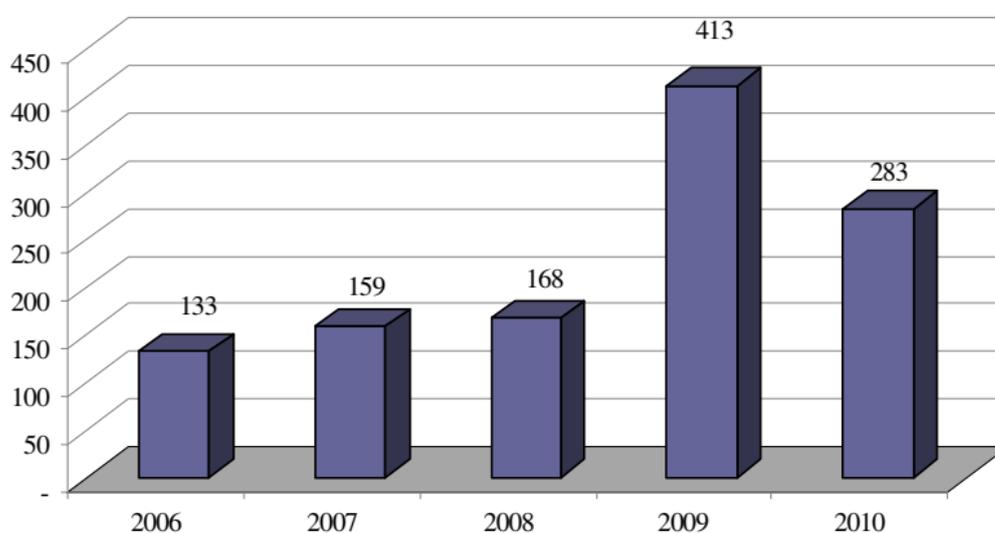


Figura 10. Número de deslizamentos em encostas registrados no município de Jaboatão dos Guararapes entre 2006 e 2010. Fonte: Defesa Civil de Jaboatão dos Guararapes.

2.4 RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E OS MOVIMENTOS DE MASSA

A chuva é o principal gatilho reconhecido para a ocorrência de deslizamentos, e diversas pesquisas tentam determinar a quantidade de precipitação necessária para desencadear ruptura de taludes, um problema de interesse científico e social (GUZZETTI *et al.*, 2008; SEGONI *et al.*, 2018). Uma revisão recente mostra que 90% de todos os deslizamentos registrados na América Latina e no Caribe foram provocados por episódios de chuvas intensas (SEPULVEDA & PETLEY, 2015). Pesquisas realizadas no Brasil apontam que a maioria dos deslizamentos registrados no país foram induzidos por eventos de precipitação (CALVELLO *et al.*, 2015; DASMACENO & CARDOSO, 2018; METHODIEV *et al.*, 2018).

Segundo Tatizana *et al.* (1987a), a intensidade e duração da chuva favorecem nos processos de instabilização das encostas, uma vez que a infiltração da água diminui a

resistência dos materiais do solo. Quando ocorre a precipitação, aumenta a quantidade de água no solo que leva ao surgimento de poropressões.

A relação entre os deslizamentos e os índices pluviométricos tem levado pesquisadores a estabelecer procedimentos para cálculo de limiares de eventos monitorados pela chuva. O limiar pode ser determinado com base no processo físico ou através de análises determinística, probabilística ou estatística a partir de dados históricos. De acordo com Segoni *et al.* (2018), os limiares de chuva são definidos como as condições de chuva que, quando atingidas ou excedidas, provavelmente desencadearão deslizamentos.

Guzzetti *et al.* (2007) afirmaram que, para a definição de limiares de chuva podem ser usadas abordagens em bases físicas (baseadas em processos, conceitos) e empíricas (limiares históricos, estatísticos). Limiares empíricos de precipitação para ocorrência de deslizamentos foram propostos em diferentes tipos de escala (global, regional e local) a partir de uma ampla variedade de parâmetros de precipitação, configurações fisiográficas e diferentes tipos de deslizamentos (GUZZETTI *et al.*, 2008). Com base nas medições de precipitação utilizadas, os limiares empíricos de precipitação podem ser agrupados em duas categorias principais: (i) limiares que combinam medições de precipitação obtidas para um evento específico de precipitação e (ii) limiares que consideram as condições antecedentes de chuva acumulada.

A exposição de diferentes países a riscos relacionados a movimentos de massa fez crescer uma intensa atividade de pesquisa aplicada as ferramentas de previsão e em sistemas de alerta prévio. A literatura recente relata que a maior concentração de limiares implementados está localizada em dois países: Itália e China (SEGONI *et al.*, 2018). Uma extensa lista de estudos no campo de deslizamentos pode ser verificada em todos continentes, consideravelmente uma porcentagem de trabalhos está representada na América do Sul.

Os limiares empíricos podem ser obtidos utilizando combinações de parâmetros através de medidas de precipitação que resultaram (ou não resultaram) em deslizamentos, dessas combinações podem-se destacar os limiares que combinam a intensidade de chuva e a sua duração (ID) e o limiar que relaciona a quantidade acumulada de chuva do evento e a sua duração (ED). Outra abordagem bastante utilizada se baseia em condições antecedentes de precipitação, ao qual os limiares podem ser obtidos a partir da

precipitação acumulada antecedente de 3, 15 e 30 dias (LEE *et al.*, 2015; ALTHUWAYNEE *et al.*, 2018).

Peruccacci *et al.* (2012) analisaram eventos de chuva responsáveis por causar ocorrências de deslizamentos para estabelecer um limiar (ED) na área central da Itália, eles mostraram que eventos de chuva de curta duração desencadeiam deslizamentos entre maio e setembro e que longos períodos de chuva associados a sistemas frontais resultaram em deslizamentos de outubro a abril. Com relação ao limiar ID, Althuwaynee *et al.* (2018) encontraram que a intensidade da chuva capaz de causar deslizamentos na região norte da Turquia variou entre 25 a 140 mm/dia, ao qual os eventos de curta duração foram os mais satisfatórios para a ocorrência de deslizamentos (Figura 11).

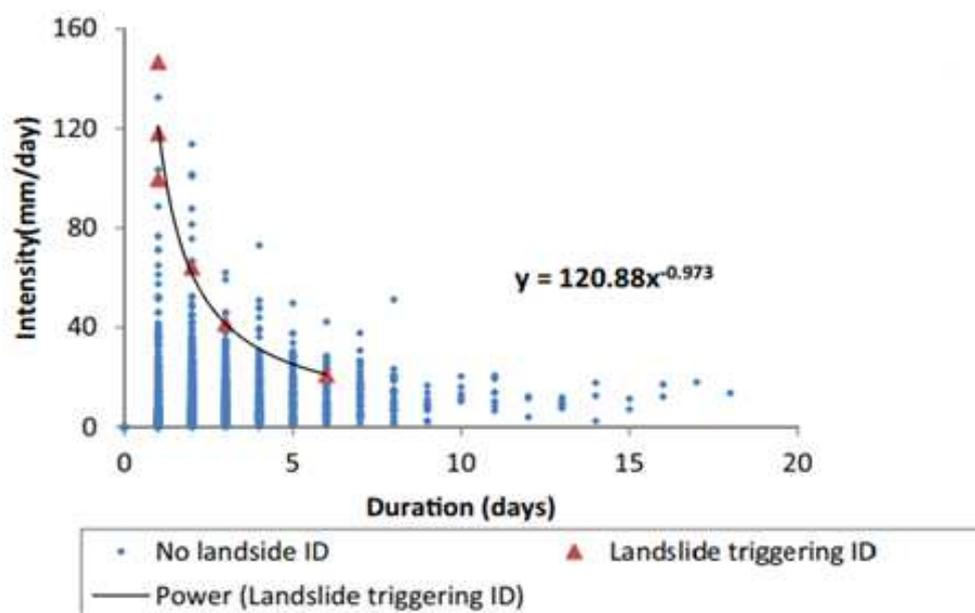


Figura 11. Limiar pluviométrico ID para a região norte da Turquia. Os pontos azuis representam as chuvas que não causaram deslizamentos e os vermelhos as chuvas que tiveram relação com deslizamentos.

No Brasil ainda existem poucos trabalhos publicados dentro da temática que envolve deslizamentos deflagrados pela chuva a partir de limiares de precipitação, assim, torna-se relevante elaborar mais estudos específicos para diferentes áreas sujeitas a deslizamentos. Há várias metodologias de estudos para avaliar os limiares de precipitação propostos por diferentes autores (Quadro 4) através de análises específicas para cada área de estudo, mostrando a relevância de estudos para aumentar a eficiência das ações de redução e prevenção de riscos baseados nas condições meteorológicas.

Quadro 4. Limiares de precipitação relacionados à ocorrência de deslizamentos em diferentes cidades brasileiras.

AUTORES E ANO	LOCAL DE ESTUDO	LIMIARES DE PRECIPITAÇÃO QUE DESENCADEIAM DESLIZAMENTOS
Tatizana <i>et al.</i> , 1987a	Cubatão – São Paulo	100 mm/24 horas + 150 mm/2 dias + 300 mm/3 dias consecutivos
Elbachá <i>et al.</i> , 1992	Salvador – Bahia	120 mm/4 dias
Xavier, 1996	Belo Horizonte – Minas Gerais	30 mm/24 horas + 50 mm/ 2 dias
Santoro <i>et al.</i> , 2010	Campinas, Baixada Santista, Litoral Norte, Sorocaba e Vale do Paraíba - SP	60 a 100 mm/4 dias
Soares & Ramos, 2015	João Pessoa – Paraíba	50 mm/24 horas + 150 mm/4 dias
Bandeira & Coutinho, 2015	Região Metropolitana de Recife – Pernambuco	40 mm/3 dias (zona norte, nordeste e noroeste), 60 mm/3 dias (zona sul), 80 mm/3 dias (zona oeste)
Mendes <i>et al.</i> , 2015	São José dos Campos – São Paulo	20 a 50 mm/24h + 50 mm/3dias
Molina <i>et al.</i> , 2015	São Bernardo do Campo – SP	50 mm/24h + 150 mm/4 dias.
Barbosa, 2017	Manaus – AM	30 mm/24h + 81 mm/4 dias.

Um dos primeiros trabalhos desenvolvidos no Brasil mostrando a relação entre chuva e deslizamento foi proposto por Tatizana *et al.* (1987), onde foram feitas análises de eventos de deslizamento nas encostas da serra do Mar (Cubatão,SP), em um período de 30 anos (a partir de 1956). Neste estudo a suscetibilidade aos processos geodinâmicos na região foi analisada de acordo com as chuvas de curta duração e acumulada de dias anteriores, selecionando os eventos de chuva com valores superiores a: 100 mm/dia, 150 mm/2 dias e 200 mm/3 dias, resultando em 35 eventos de chuva. Por meio de gráficos de dispersão compararam a distribuição dos registros de precipitação horária e diferentes dias de precipitação acumulada antecedente para períodos com e sem ocorrências de

deslizamento, observando um resultado mais satisfatório para a precipitação acumulada de quatro dias para a instabilidade das encostas.

Santoro *et al.* (2010) destacam a importância da adoção de limiares de precipitação para cada local de ação dos Planos Estaduais de Proteção e Defesa Civil (PPDC) dentro de uma determinada região. A importância da elaboração de limiares críticos de precipitação específicos para cada município e/ou área de risco nos estudos da influência da chuva na deflagração de deslizamentos é justificado pelo fato de as características meteorológicas, geológicas e geomorfológicas não ocorrerem de maneira homogênea por todo o território brasileiro (IDE & MACEDO, 2005). De acordo com a Fundação Instituto Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (D'ORSI *et al.*, 2012), a atualização ou redefinição dos limiares pluviométricos críticos pode ocorrer com base na investigação de no mínimo cinco anos de dados de deslizamento e de chuva para a região de estudo.

O Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro (DRM-RJ) definiu para região serrana que os limiares críticos para deflagração de deslizamentos consideram os seguintes acumulados de precipitação: 40 mm em 1 hora + 100 mm em 24 horas + 115 mm em 96 horas + 270 mm em 30 dias, enquanto que pra região metropolitana, a fundação GeoRio determina os limiares de precipitação: ≥ 40 mm em 1 hora ou ≥ 125 mm em 24 horas ou ainda 200 mm em 96 horas + ≥ 40 mm em 24 horas (DMR-RJ, 2017).

No Estado de São Paulo foram propostos os seguintes limiares de chuva pela Defesa Civil: 80 mm em 72 horas para grande parte do Vale do Paraíba, 60 mm em 72 horas para a região da Serra da Mantiqueira e São Luiz do Paraitinga e 100 mm em 72 horas para a região litorânea que compreende a áreas da Baixada Santista (IG-SP, 2017). Por outro lado, Hader (2021) identificou que o período com maior potencial para causar deslizamentos foi o da chuva acumulada de 3 dias, sendo o intervalo entre 210 a 245 mm com maior probabilidade de deflagração na cidade de Cubatão na Região Metropolitana da Baixada Santista. Em Santos (SP), de Oliveira Santos *et al.* (2019) determinaram que 75 mm em 48 horas é suficiente para causar deslizamentos na cidade.

Na região Sul, o Sistema AlertaBlu, no município de Blumenau adotou critérios pluviométricos para determinação da probabilidade de deslizamentos através de acumulados de chuva em 1 hora, em 24 horas e 168 horas, em que a probabilidade muito alta ocorre quando o acumulado é > 50 mm/h, > 150 mm/24h e > 210 mm/168h (ALERTABLU, 2021). Para região Norte, em Manaus, Barbosa (2017), verificou casos

de deslizamentos em que a precipitação acumulada em 4 dias atingiu valores em torno de 190 mm.

Para cidade de Recife, Bandeira & Coutinho (2015) mostraram que as chuvas causaram 190 deslizamentos na parte sul da cidade em 2009. Desse total, 131 deslizamentos ocorreram quando a chuva acumulada em 72 horas foi superior a 60 mm, com maior número de casos de deslizamentos sendo verificados no intervalo de chuva de 120 a 150 mm. Para mesma área de estudo, Souza *et al.* (2012) através da técnica dos quantis relacionou os limiares quantílicos com os deslizamentos durante dois períodos chuvosos, e observaram que o limiar de precipitação diária ≥ 55 mm tem maior potencial para causar deslizamentos. Verificaram ainda que as condições de infraestrutura influenciavam na ocorrência frequente de deslizamentos na região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o município de Jaboatão dos Guararapes, localizado no Estado de Pernambuco (Figura 12). O seu território é limitado ao norte pelo município de São Lourenço da Mata e Recife, ao oeste faz fronteira com o município de Moreno, ao sul com a cidade de Cabo de Santo Agostinho e a leste é banhada pelo oceano Atlântico (Figura 12b). Sua extensão territorial é de aproximadamente 258.724 km² com população estimada de 711.330 habitantes (IBGE, 2021). Jaboatão dos Guararapes possui uma área total de 97,75% de área urbana e apenas 2,25% de área rural, sendo dividido em 27 distritos e Divisão Política Administrativa de 7 Regionais (Figura 12b): 1) Jaboatão Centro; 2) Cavaleiro; 3) Curado; 4) Muribeca; 5) Prazeres; 6) Praias; 7) Guararapes. No Quadro 5 é possível observar os bairros inseridos em cada Regionais político-administrativas de Jaboatão dos Guararapes. De acordo com o Plano Diretor do município, Jaboatão dos Guararapes possui 27 bairros, sendo que algumas partes dos bairros de Jardim Jordão, Guararapes e Prazeres estão divididos entre a Regional 5 e a Regional 7.

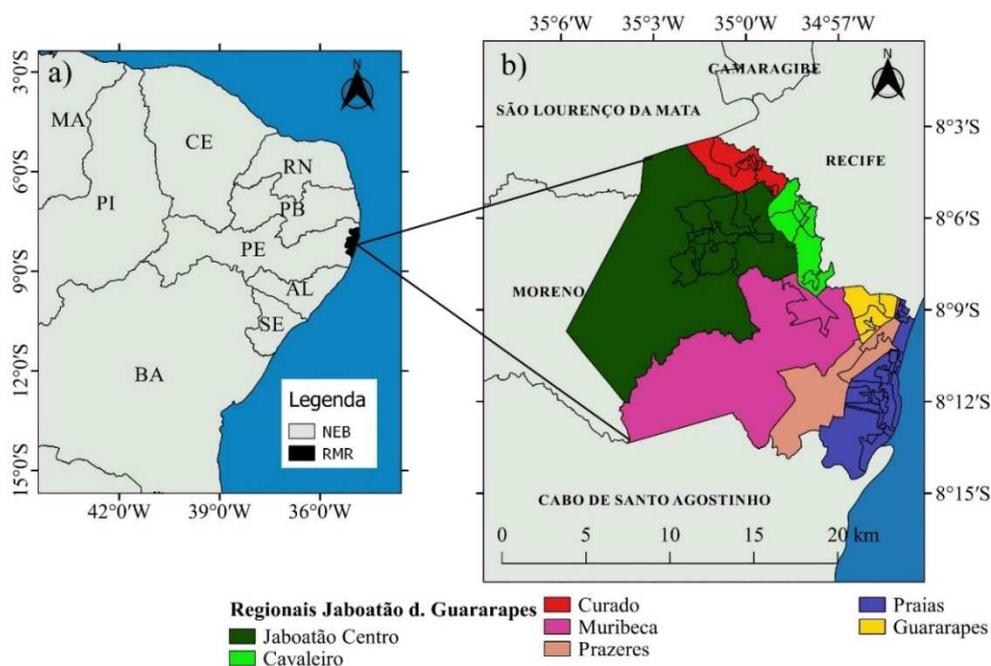


Figura 12. (a) Localização geográfica da Região Metropolitana de Recife (RMR); (b) Regiões político-administrativas de Jaboatão dos Guararapes (Regionais: 1. Jaboatão Centro; 2. Cavaleiro; 3. Curado; 4. Muribeca; 5. Prazeres; 6. Praias; 7. Guararapes).

Quadro 5. Regionais administrativas de Jabotão dos Guararapes e os seus respectivos bairros.

REGIONAL	BAIRROS
1. Jabotão Centro	Manassú; Bulhões; Santana; Socorro; Santo Aleixo; Engenho Velho; Vargem Fria; Vila Rica; Muribequinha; Centro; Vista Alegre; Floriano;
2. Cavaleiro	Cavaleiro; Dois Carneiros; Sucupira; Zumbi do Pacheco;
3. Curado	Curado I; Curado II; Curado III; Curado IV; Curado V;
4. Muribeca	Marcos Freire; Muribeca;
5. Prazeres	Comportas; Prazeres; Cajueiro Seco;
6. Praias	Piedade; Barra de Jangada; Candeias;
7. Guararapes	Guararapes; Jardim Jordão;

De acordo com o critério de Classificação de Köppen, o município de Jabotão de Guararapes apresenta clima tropical úmido (A – Tropical Zone), onde as temperaturas médias variam entre 24 e 26 °C, prevalecendo a categoria de clima As com estação chuvosa que começa no outono e permanece no inverno do Hemisfério Sul (ALVARES *et al.*, 2014). A Figura 13 mostra uma série histórica da precipitação média registrada na cidade de Jabotão de Guararapes entre 1994 a 2017, onde pode-se observar que o máximo de precipitação ocorre entre abril e julho, com médias mensais acima de 150 mm. Este período é considerado crítico para as unidades de defesa civil da RMR, visto que já foram registrados diversos casos de deslizamentos e inundações (BANDEIRA & COUTINHO, 2015).

As características geológicas na cidade de Jabotão dos Guararapes apresentam conjuntos distintos de unidades geológicas sendo representadas por litótipos dos complexos Gnáissico-Migmatítico/Belém São Francisco, da Formação Cabo, Formação Barreiras e depósitos quaternários (CPRM, 1996).

Os complexos Gnáissico-Migmatítico/Belém São Francisco são compostos de rochas cristalinas de idade Paleoproterozóica constituídos essencialmente de ortognaisses de composição tonalítico, granítico, migmatito e dioríticos (CPRM, 2003). A Formação Cabo é classificada como um “rift” extensional associado a um magmatismo bimodal

aflorante, composta por conglomerados polimíticos, arenitos, argilitos e turbiditosarenopelíticos de idade cretácea.

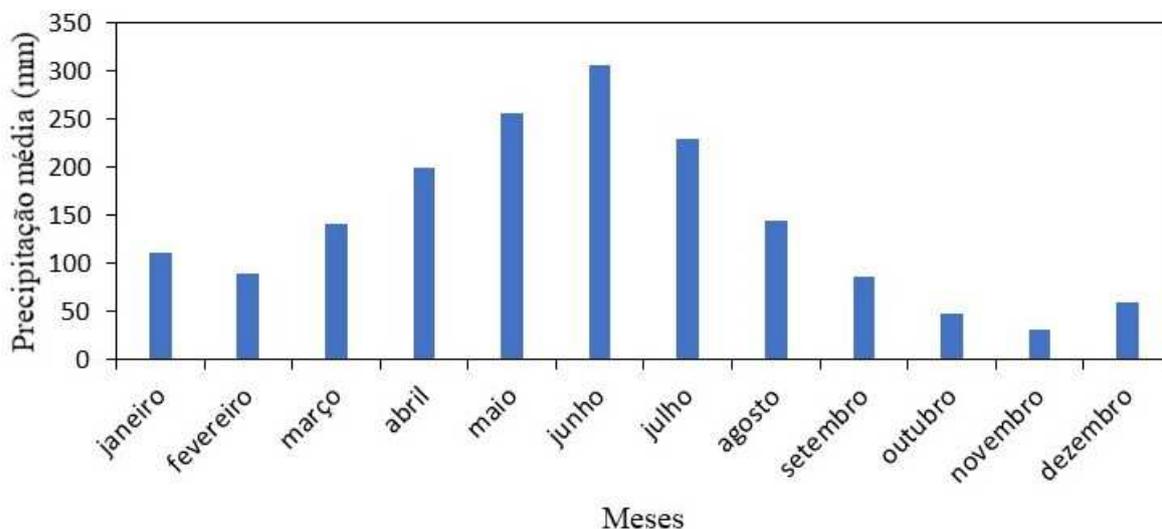


Figura 13. Distribuição anual da precipitação média em Jaboaão dos Guararapes pelo histórico mensal de 1994 a 2017. Fonte: COUTINHO *et al.*, (2020).

As áreas de encostas da RMR estão representadas pela Formação Barreiras, formada por sedimentos areno-argilosos, pouco consolidados, com níveis lateritizados e caulínicos de idade Terciária (CPRM, 2003). Segundo Alheiros *et al.* (1988), essa formação apresenta domínio faciológico fluvial caracterizado por apresentar a presença de cascalhos e areias feldspáticas de textura avermelhada. A ação do intemperismo químico na região impacta fortemente os processos de movimentação de massa, visto que contribuem para o aumento do teor de argila, levando ao rompimento do talude (PFALTZGRAFF, 2007).

Os sedimentos quaternários que dominam toda faixa costeira da RMR se distribuem pelas regiões mais baixas, sendo agrupados em origem marinha, fluvial, lagunar, flúvio-lagunar, depósitos de mangues, depósitos de recifes, depósitos colúvio-aluviais e eluviais. Em geral, esses sedimentos são compostos por areias, siltes, argilas e sedimentos turfáceos (CPRM, 1996).

No que diz respeito à sua geomorfologia, o município de Jaboaão dos Guararapes apresenta basicamente sete unidades de relevo (Figura 14): planícies, terraços, tabuleiros, colinas, morros, vertentes e rampas (CPRM, 1997). O domínio geomórfico de planície corresponde as superfícies muito baixas e planas que ocorrem ao longo de todo o litoral da RMR, onde se apresentam em formas marinhas (praia e recifes de arenito), formas fluviais (terraços) e formas de transição (mangue e planície flúvio-lagunar). Dentro do

domínio das planícies, os terraços são caracterizados por altitudes intermediárias, variando de 2 a 10 m, formados por areias quartzosas.

Os tabuleiros estão situados na porção mais a leste do município, próximo da fronteira com o município de Recife, sendo formados por sedimentos da Formação Barreiras (PFALTZGRAFF, 2007). Apresentam topos tabulares com altitudes que podem atingir 100 m e encontram-se bastante dissecados. O domínio das colinas e morros, abrange toda a porção oeste e nordeste do município, indicando formas de relevo mais elevadas com topos mais arredondados, formadas por rochas cristalinas com desnível máximo de 250 m (CPRM, 1997).

As vertentes são unidades do relevo que se caracterizam por ocorrerem vários processos, principalmente de ordem erosiva, que reflete de alguma forma na configuração de ocupação humana (CPRM, 2003). São influenciadas principalmente pela ação climática e sua litologia é constituída de sedimentos da Formação Barreiras. Em algumas áreas das vertentes predominam declives suavizados, onde observa-se a ocorrência de rampas de colúvio, sendo formadas por acumulação de detritos provenientes do topo ou da parte superior da vertente (MOURA & SILVA, 1998).

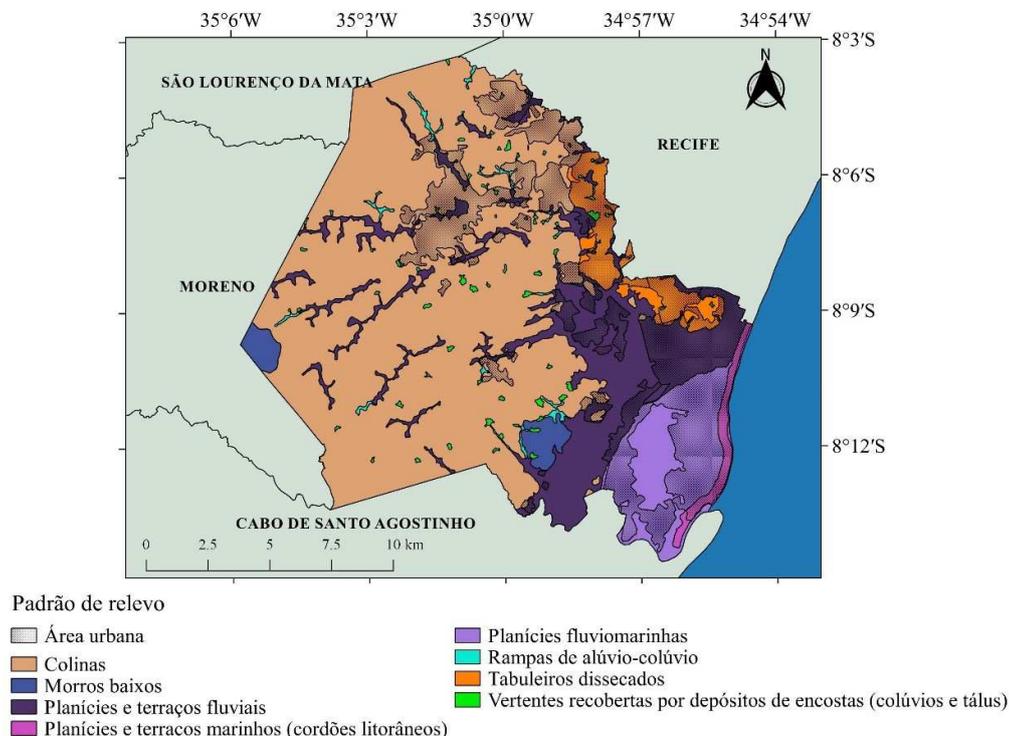


Figura 14. Padrões de relevo situados no município de Jaboatão dos Guararapes. (Fonte de dados: CPRM).

No município podem ser encontrados seis unidades de solo: latossolo vermelho amarelo distrófico, podzólico vermelho amarelo, podzol hidromórfico, solos aluviais, areias quartzosas marinhas e solos indiscriminados de mangues (CPRM, 1996). Ocupando uma área de 61,8% do município, o solo podzólico vermelho amarelo caracteriza-se por possuir saturação com alumínio geralmente superior a 50%, é argiloso, profundo e de baixa fertilidade e suscetível a erosão.

O latossolo vermelho amarelo distrófico é caracterizado por apresentar uma elevada porcentagem de argila e baixo teor de silte e areia, é um solo ácido e de baixa fertilidade natural, pouco sujeito a erosão (CPRM, 1996). Apresentando uma constituição predominante arenosa estão os solos podzolhidromórfico e areais quartzosas marinhas, originados a partir de sedimentos quaternários na área da baixada litorânea, são de baixa fertilidade e ácidos.

Os solos aluviais são pouco desenvolvidos, não hidromórficos, ácidos e com fertilidade natural variando de baixa a alta, enquanto que os solos indiscriminados de mangue apresentam alto teor de sais, oriundos das águas marinhas e se distribuem nas partes mais baixas do município (CPRM, 1996).

A cobertura vegetal do município é composta fundamentalmente, por tipos cultivados, onde se predomina a cana-de-açúcar e as culturas de subsistência (milho, feijão, banana, etc.), frequentemente isoladas em meio aos canaviais ou concentradas próximas a pequenas áreas urbanas (CPRM, 1996). Além da cana-de-açúcar e das culturas de subsistência, podem ser encontrados alguns coqueirais, cultivados principalmente nas áreas mais próximas ao litoral sul (CPRM, 1997).

Em poucas áreas observa-se resquícios de Mata Atlântica e um pouco de cobertura vegetal nativa, como capoeira, capoeirinha, vegetação arbustiva, vegetação higrófila e vegetação de manguezal (CPRM, 1997). As áreas sem cobertura vegetal estão restritas nos limites das concentrações urbanas, sendo amplificada a cada ano.

3.2 DADOS

Para realização deste estudo, foram utilizadas informações que permitiram identificar a predisposição a deslizamentos na área de estudo, avaliar a variabilidade espaço-temporal da ocorrência de precipitação e deslizamentos, analisar a quantidade de precipitação necessária para a ocorrência de deslizamentos, verificar as condições atmosféricas de um evento na CLNEB e examinar a habilidade do *Regional Climate*

Model (RegCM) em representar a chuva do estudo de caso. A seguir tem-se a indicação do conjunto de informações que foram utilizadas:

- a) Mapas anuais de uso e ocupação do solo do bioma Mata Atlântica entre o período de 1985 a 2015 oriundos da coleção 5 do MapBiomias;
- b) Dados vetoriais de suscetibilidade e setores de risco à deslizamentos fornecidos pela CPRM;
- c) Mapa de suscetibilidade a deslizamentos do Brasil disponibilizados pelo IBGE;
- d) Relatórios de ocorrências de deslizamentos disponibilizados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN);
- e) Boletins meteorológicos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC);
- f) Registros de precipitação do CEMADEN;
- g) Informações do Modelo Digital de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topographic Mission* v4.1 (STRM v4.1) com 90 m de resolução espacial.
- h) Dados horários de reanálise em níveis de pressão e superfície para os parâmetros, componente zonal e meridional do vento, velocidade vertical, divergência do vento, Radiação de Onda Longa (ROL) e Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado (CFUVI) disponibilizados pelo *European Centre Medium-Term Weather Forecasts* (ECMWF) do conjunto Era-5.
- i) Imagens de satélite do canal 13/GOES-16 com resolução espacial de 2 km na banda do infravermelho, disponíveis no CPTEC;
- j) Dados do radar meteorológico de Maceió e Natal do CEMADEN;

3.3 MÉTODOS

Os procedimentos para o desenvolvimento da pesquisa foram divididos em etapas:

i) Levantamento de crescimento urbano na área de estudo, ii) identificação dos setores de risco e áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, iii) levantamento das informações de deslizamentos e precipitação, iv) filtragem e processamento dos dados, v) relação entre a precipitação e os deslizamentos e vi) estudo de caso de um evento extremo de chuva na CLNEB.

3.3.1 Levantamento do crescimento urbano na área de estudo

Inicialmente, com o propósito de analisar a evolução urbana em Jaboatão dos Guararapes, foram utilizados mapas anuais de cobertura do solo no formato matricial (pixel de 30x30 m) em uma escala de 1:100.000 que descrevem as mudanças de uso e ocupação do solo no período de 1985 a 2015, a partir do conjunto de dados da coleção 5 do projeto MapBiomas. O projeto MapBiomas (<http://mapbiomas.org>), uma rede de instituições colaborativas derivada da iniciativa Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e Observatório do Clima, mapeia os principais tipos de uso e ocupação do solo anualmente entre 1985 e 2019 para os principais biomas brasileiros, a fim de contribuir para o entendimento da dinâmica do uso do solo no Brasil. Essas séries anuais de mapas de cobertura do solo foram obtidas com resolução de 30 m, por meio de composições de mapas e classificação de imagens Landsat usando *Random Forest* na nuvem do *Google Earth Engine* (GEE). A classificação compreende 21 classes de cobertura do solo para todo o Brasil. Neste estudo foram utilizadas as classes de área urbana, área com vegetação e agropecuária para verificar a evolução urbana em Jaboatão dos Guararapes em 4 anos distintos (1985, 1995, 2005 e 2015).

3.3.2 Setores de suscetibilidade e risco à deslizamentos

Em agosto de 2012, a CPRM deu início a elaboração de cartas de suscetibilidade nas escalas 1:25.000 e 1:50.000, que representam informações sobre a suscetibilidade a deslizamentos e inundação em municípios prioritários sujeitos à ocorrência desses fenômenos no território brasileiro (IPT, 2014). O mapeamento consistiu numa modelagem matemática utilizando diversos métodos e procedimentos disponíveis na literatura técnico-científica nacional e internacional acerca do zoneamento de suscetibilidades a processos no meio físico, com destaque para aqueles potencialmente geradores de desastres naturais.

Adicionalmente, visando contribuir para a melhoria e a ampliação da divulgação de informações sobre deslizamentos no Brasil, o IBGE fez um mapeamento de suscetibilidade à deslizamentos, compatível com a escala de 1:1.000.000, utilizando a base de dados do próprio instituto, nas áreas de geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, e uso e cobertura da terra, bem como informações provenientes de fontes externas (IBGE, 2019).

Neste sentido, foram utilizados os dados vetoriais do município de Jabotão dos Guararapes relativos a cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação (<http://geoportal.cprm.gov.br/desastres/>), para identificar as áreas com suscetibilidade alta a deslizamentos no município. Além disso, foi feito um recorte do mapa de suscetibilidade a deslizamentos do IBGE para mostrar a área de abrangência dos deslizamentos que ocorreram na CLNEB no estudo de caso de maio 2017.

A análise dos setores de risco foi realizada com base na setorização de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações em maio de 2019 no município de Jabotão dos Guararapes (<http://riogeo.cprm.gov.br/handle/doc/21668/>), assim, foram utilizados os dados vetoriais dos setores de risco referentes aos deslizamentos.

3.3.3 Informações sobre deslizamentos e precipitação

O levantamento de dados de deslizamentos foi realizado através dos relatórios e boletins de registro de ocorrência para o município de Jabotão dos Guararapes entre os anos de 2016 a 2020 disponibilizados pelo CEMADEN, pois o Banco de Registro de Ocorrência do CEMADEN possui histórico a partir de 2016. Nas ocorrências constam informações de data e horário de ocorrência, localização (latitude, longitude e Regional) e danos humanos (Anexo A). Os deslizamentos foram manipulados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) com a finalidade de analisar a sua variabilidade espacial e temporal.

Além disso, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shuttle Radar Topographic Mission* v4.1 (SRTM v4.1), disponível para América do Sul com a resolução espacial de cerca de 90 m (<http://cgiarcsi.community/>). O SRTM v4.1 é indicado para o mapeamento digital do solo, especialmente quando predominam relevos ondulados planos e suaves (TESKE et al., 2014). Neste estudo, o SRTM v4.1 foi utilizado para a elaboração do mapa de altitude em Jabotão dos Guararapes, visto que a elevação é um dos fatores condicionantes para a ocorrência de deslizamentos.

No presente estudo foram utilizadas medidas de precipitação da Rede de Monitoramento de Desastres Naturais do CEMADEN para o período de janeiro de 2016 a dezembro de 2020 (<http://cemaden.gov.br/mapainterativo/>). Os dados desta rede são relevantes para medir a quantidade e a intensidade das chuvas que possam deflagrar deslizamentos, inundações e enxurradas, assim como auxiliar na elaboração de diferentes

níveis de alerta. A partir de 2016 foram identificadas 9 estações pluviométricas em Jaboatão dos Guararapes, porém, foram utilizadas apenas as estações Barra de Jangada, Cajueiro Seco, Cavaleiro, Centro e Curado II por apresentarem a menor quantidade de falhas para o período de estudo avaliado. Os dados referentes às estações utilizadas nas análises constam na Tabela 1. Nesta tabela foram descritas as informações do código da estação, latitude e longitude.

Os pluviômetros possuem frequência a cada uma hora em horário UTC (*Coordinated Universal Time*/Tempo Universal Coordenado), entretanto, na ocorrência de chuva o pluviômetro é programado para realizar as medidas a cada 10 minutos. Os dados foram processados e convertidos em hora local, sendo os resultados apresentados na forma diária, para isso foi necessário realizar a conversão do horário através da seguinte expressão: UTC – 3 (Horário Local de Recife).

Tabela 1. Informações das estações pluviométricas automáticas do CEMADEN localizadas em Jaboatão dos Guararapes.

Estação Pluviométrica	Código da estação	Latitude	Longitude
Barra de Jangada	260790109A	-34,932	-8,22
Cajueiro Seco	260790110A	-34,928	-8,168
Cavaleiro	260790103A	-34,971	-8,096
Centro	260790107A	-35,015	-8,112
Curado II	260790108A	-34,997	-8,08

Complementarmente, para a análise da distribuição espacial da chuva para o período chuvoso (abril-julho) dos anos estudados em Jaboatão dos Guararapes, foi realizada a interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW – *Inverse Distance Weighting*) por meio de ambiente SIG, o qual é um método de interpolação em que os pesos das amostras são dados de acordo com a influência de um ponto em relação ao outro, sendo que quanto maior a distância, menor a influência. Este método de interpolação é mais indicado em regiões planas, sem influência da variação topográfica, assim podendo apresentar desempenho moderado (LUCAS *et al.*, 2013). O principal motivo de utilizar a interpolação foi observar a precipitação acumulada no período chuvoso em cada estação pluviométrica e comparar com a climatologia do período chuvoso da série histórica de 1994 a 2017 proposto por Coutinho *et al.* (2020).

3.3.4 Relação entre precipitação e deslizamentos

A relação entre a precipitação e os deslizamentos foi analisada de três formas, a primeira foi embasada pela relação da intensidade e duração da chuva (ID), assim como pela precipitação acumulada do evento pela sua duração (ED), a segunda pela precipitação acumulada antecedente de 24 horas, 48 horas, 72 horas e 96 horas antes das ocorrências de deslizamentos na cidade e a terceira pela quantidade de deslizamentos que foram observados nos intervalos de chuva acumulada em 72h em cada Regional de Jabotão dos Guararapes.

Primeiramente, os dados diários de precipitação nas 5 estações pluviométricas passaram por análises estatísticas descritivas para verificar se as estações apresentavam boa correlação e similaridade pelo fato de estarem situadas em diferentes localidades. Em seguida, foi observado o número de dias com chuva registrado em cada estação, e posteriormente foi estabelecido um único valor de precipitação diária através da média das 5 estações pluviométricas para relacionar com as ocorrências de deslizamento na cidade.

Para avaliar a dependência de deslizamentos em medidas de precipitação foi utilizada a abordagem de limiares empíricos de precipitação proposta por Guzzetti *et al.* (2007), através do qual foi determinado limiares para ocorrência de deslizamento com base na precipitação diária, utilizando a relação entre intensidade e duração (ID) e a relação entre a precipitação acumulada dos eventos de chuva e sua duração (ED). Foram estabelecidos critérios para a filtragem de casos, separando eventos de chuva *com* e *sem* ocorrência de deslizamento. Um evento de chuva foi caracterizado quando o pluviômetro registra valores de precipitação continuamente até o dia que não for registrado nenhum valor de precipitação, a duração (D) refere-se ao número de dias entre o período de início e fim da ocorrência do evento de chuva, a precipitação acumulada do evento (E) é o somatório dos valores de precipitação ao longo da duração e a intensidade (I) foi caracterizada como a razão entre a precipitação acumulada do evento de chuva e a sua duração (E/D).

O Quadro 6 mostra um exemplo esclarecendo como foram definidos a duração (D), a intensidade (I) e a precipitação acumulada dos eventos de chuva (E). Por exemplo, no primeiro evento de chuva entre os dias 5 e 6 de maio de 2016, a precipitação acumulada do evento (E) foi de 52,5 mm com duração (D) de 2 dias e intensidade (I) de 26,25 mm,

enquanto que o segundo evento de chuva entre os dias 8 e 9 de maio de 2016 foi verificado um acumulado de 125 mm em 2 dias e intensidade de 62,5 mm.

Quadro 6. Informações referentes a definição da precipitação acumulada dos eventos de chuva (E), duração (D) e intensidade (I). A data em vermelho evidencia que neste dia houve ocorrência de deslizamento.

Data	Acumulado diário (mm)	Duração por dia (D)	Precipitação acumulada do evento (mm) (E)	Intensidade (mm) (E/D)
04/05/2016	0		-	-
05/05/2016	2,2	1	2,2	2,2
06/05/2016	50,3	2	52,5	26,25
07/05/2016	0			
08/05/2016	15,8	1	15,8	15,8
09/05/2016	109,2	2	125,0	62,5

Os limiares (ID) e (ED) foram produzidos usando o acumulado diário de precipitação através das equações mais comuns encontradas na literatura, a qual a curva de limiar é assumida a partir de:

$$I = \alpha D^{-\beta} \quad ; \text{ para (ID)} \quad (1)$$

$$E = \alpha D^{-\beta} \quad ; \text{ para (ED)} \quad (2)$$

Foi utilizada uma equação da lei de potência, em que I é a intensidade média da precipitação (mm/dia), D é a duração do evento de precipitação (dia), E é a precipitação acumulada do evento de chuva, α é uma constante de escala e β é o parâmetro de forma que controla a inclinação da curva do limiar.

Com a informação do horário de ocorrência, foi possível analisar a precipitação acumulada que precedeu os casos de deslizamentos em Jaboaão dos Guararapes. Dessa forma, foi feita a análise exploratória dos dados para avaliar a chuva antecedente em 24h, 48h, 72h e 96 horas anteriores a partir de *boxplots* para identificar as medidas de variabilidade, tendência central e valores extremos na amostra de dados. Para os dias em que foram observados mais de uma ocorrência foi utilizado o último horário que foi registrado ocorrência como referência e para os dias em que o horário de ocorrência esteve ausente foi utilizado o último horário do dia (00:00).

Para avaliar a representatividade das medições de cada pluviômetro nas ocorrências de deslizamentos registradas em Jaboaão dos Guararapes foram analisados os dados de chuva com base no pluviômetro mais próximo que registrou a ocorrência. Assim, foi analisada a precipitação acumulada antecedente de 72h para verificar os intervalos de chuva com maior frequência de deslizamentos para cada Regional da cidade.

3.3.5 Estudo de caso na CLNEB em maio de 2017

Os sistemas meteorológicos atuam como precursores de desastres ambientais no Brasil, assim, torna-se importante determinar as características dos processos atmosféricos através da análise de campos espaciais de variáveis atmosféricas. Diante disso, foram utilizadas as principais informações (boletins, dados de precipitação, imagens de satélite, produtos de radar e dados de reanálises) para o evento de chuva extrema relacionado aos deslizamentos na CLNEB. Os dados de deslizamento e precipitação foram obtidos a partir do banco de dados do CEMADEN entre o período de 23 a 31 de maio de 2017.

a. Dados de reanálises

Para a análise das condições atmosféricas foram utilizados dados horários do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) fifth generation climate reanalysis dataset* (ERA5, Hersbach *et al.*, 2020), com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para o mês de maio de 2017. As variáveis utilizadas foram: componente zonal (u) e meridional (v) do vento, velocidade vertical (W), Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado (CFUVI), Radiação de Onda Longa (ROL) e a divergência do vento.

b. Imagens de satélite

A interpretação das imagens de satélite permite uma análise da extensão, intensidade e evolução temporal do sistema meteorológico envolvido. Neste sentido, foram utilizadas imagens de temperatura de brilho na banda espectral 10,35 μm do infravermelho (canal 13), a bordo do satélite geostacionário GOES-16 com resolução espacial de 2 km, disponibilizadas pela Divisão de Satélites Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (DSA/CPTEC/INPE).

c. Radar meteorológico

As informações de radar meteorológico possibilitam estimar a intensidade da precipitação, sua velocidade de deslocamento e a extensão vertical da célula precipitante. Neste estudo foram utilizados dados volumétricos do radar meteorológico de dupla polarização de Maceió e Natal, oriundos do projeto Radares Meteorológicos do CEMADEN, destinados a fazer o monitoramento hidrometeorológico e obter informações necessárias para possíveis desastres associados a chuva em diferentes regiões do território brasileiro. As varreduras volumétricas apresentam um intervalo de repetição a cada 10 minutos com um alcance de 250 km a partir das variáveis medidas de refletividade. As análises das variáveis medidas foram exibidas em campos para visualização, através do produto *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI), usualmente utilizado para analisar a refletividade em uma altitude específica.

d. Dados de chuva TRMM

Os dados utilizados para gerar os mapas espaciais da chuva que ocorreu na CLNEB, foram obtidos a partir da estimativa de chuva feita pelo algoritmo 3B42 versão 7 do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (KUMMEROW *et al.*, 2000), disponíveis em (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>). Esses dados possuem resolução espacial de 0,25° x 0,25° e resolução temporal a cada 3 horas. Santos *et al.* (2019a,b) analisaram os dados do TRMM por comparação com dados de 267 pluviômetros da região NEB, que mostraram a consistência dos dados do satélite e também confirmaram que as estimativas do TRMM são alternativas viáveis para estudos em recursos hídricos.

e. Simulação numérica

Neste estudo, um experimento numérico foi realizado usando o modelo climático regional RegCM versão 4.7 (KUMAR *et al.*, 2020) para verificar a sensibilidade deste modelo em representar a chuva sobre a CLNEB durante maio de 2017 e para avaliar sua capacidade de prever o evento extremo de chuva que contribuiu para deslizamentos na

CLNEB. Vale ressaltar que estudos que utilizaram Modelos de Clima Regional para realizar simulações numéricas mostraram-se adequados para reproduzir a escala local da região (LOPART *et al.*, 2017; AMBRIZZI *et al.*, 2019).

A simulação numérica foi realizada utilizando a reanálise do ECMWF como ponto de partida e condição inicial em grande escala, através do produto de reanálise Era-Interim 15 (EIN15) com resolução espacial de 1,5° x 1,5°, disponível em (<http://clima.dods.ictp.it/regcm4/EIN15>). O RegCM foi executado em associação com o Community Land Model 4.5 (OLESON *et al.*, 2004; KUMAR *et al.*, 2020) para o Oceano Atlântico tropical sul e o domínio do NEB. O domínio de simulação foi configurado para ter 220 x 270 pontos de grade (49,5° W–20,5° W e 20° S–4,5° N), com 23 níveis verticais de pressão sigma, núcleo dinâmico não hidrostático e 12 km de resolução horizontal de 1 de abril a 30 de junho de 2017. A Tabela 2 apresenta um resumo dos esquemas de parametrização definidos para o experimento numérico.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na física do modelo RegCM.

Configuração	Parâmetro
Espaçamento de grade	12 km
Esquema de condições de limite lateral	Relaxamento e técnica exponencial, MARBAIX <i>et al.</i> (2003)
Esquema de Camada Limite Planetária	Holtslag PBL, HOLTSLAG (1990)
Esquema de convecção cumulus (continente)	TIEDTKE (1989;1993)
Esquema de convecção cumulus (oceano)	EMANUEL (1991)
Esquema de umidade	Umidade explícita SUBEX, PAL <i>et al.</i> (2000)
Esquema de fluxo oceano	ZENG <i>et al.</i> (1998)
Fórmula de rugosidade do modelo Zeng	$(0.0065 \times \text{ustar} \times \text{ustar}) / \text{e grav}$
Esquema de radiação	RRTM, MLAWER <i>et al.</i> (1997)
Globdatparamsstyp	ERA15
Globdatparamdattyp	ERA15

As métricas estatísticas avaliaram o desempenho do modelo RegCM na CLNEB em comparação com os dados de precipitação observacional estimados pelo satélite TRMM usando o algoritmo 3B42. As seguintes medidas foram utilizadas: erro quadrático médio (RMSE) e BIAS. O RMSE calculou a raiz quadrática média dos erros entre os valores observados (TRMM) e a simulação numérica (RegCM), enquanto que o BIAS avaliou a tendência do modelo em simular o evento, ou seja, qual foi o desvio do valor simulado em relação ao valor real.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ocupação urbana e setores de risco a deslizamentos em Jaboatão dos Guararapes

Ao longo dos anos, o município de Jaboatão dos Guararapes passou por um intenso processo de urbanização, principalmente nos setores norte, leste, no entorno da Lagoa Olho d'água e nas áreas que fazem fronteira com o município de Recife (Figura 15). Em 1985, a cidade de Jaboatão dos Guararapes apresentava poucas áreas de ocupação urbana, onde a maioria desses setores esteve concentrado na porção sudeste e na divisa com o município de Recife (Figura 15a). A partir de 1995, as áreas de agropecuária condicionaram grande parte da ocupação rural cobrindo as porções central e ocidental do município, acelerando também o processo de antropização nessas áreas (Figura 15b). Alguns locais com vegetação permaneceram intactos com o passar do tempo por serem consideradas zonas de proteção ambiental protegidas por leis (Figura 15d).

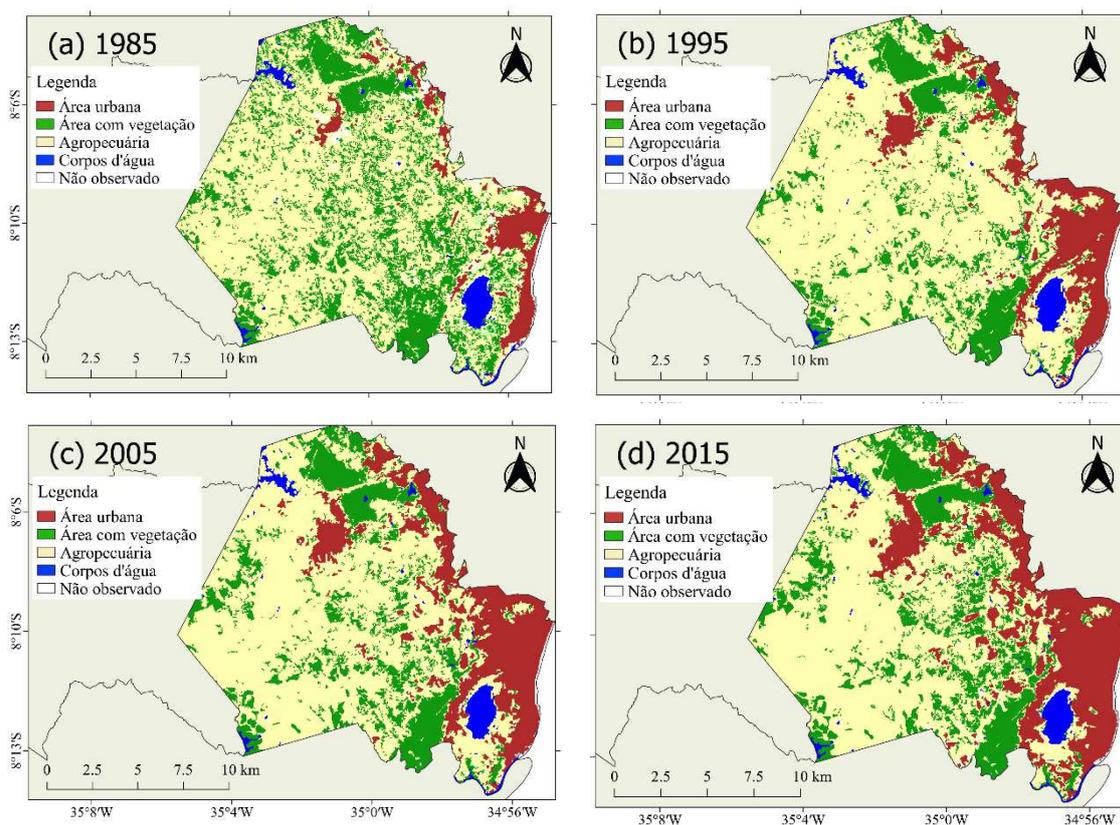


Figura 15. Evolução do uso e ocupação do solo no município de Jaboatão dos Guararapes de 1985 até 2015.

A expansão urbana em Jaboatão dos Guararapes esteve associada a diversos fatores, dentre eles pode-se destacar o aumento populacional da capital do Estado de Pernambuco,

Recife, que extrapolou os limites municipais e se espalhou para municípios adjacentes. Além disso, o fluxo migratório de pessoas vindas do interior do Estado de Pernambuco também contribuiu para a aceleração da urbanização na RMR (SILVA, 2010). O principal incentivo para a alta densidade populacional em Jaboatão dos Guararapes foi a implantação de parques industriais e os investimentos nos sistemas de transporte e habitação que ampliaram a escala territorial metropolitana (MIRANDA, 2004).

A ocupação urbana atual do município está concentrada em sua grande maioria nas zonas próximas da orla marítima, situada em relevo plano e baixo sobre os depósitos quaternários, onde há predominância de construções de grandes edifícios residenciais e comerciais ocupados por uma população de médio e alto poder aquisitivo (GALINDO, 2002). No entorno da Lagoa Olho D'água houve uma expansão acelerada de edificações sem o planejamento básico de zoneamento, que são habitadas por comunidades de baixa renda. Na faixa norte-nordeste do município, na Regional 1 (Jaboatão Centro), Regional 2 (Cavaleiro) e Regional 3 (Curado), a concentração urbana está relacionada com a construção de grandes conjuntos habitacionais populares, sendo a presença de indústrias de médio e grande porte, a principal justificativa para que a população aumentasse significativamente (GALINDO, 2002). Nessas áreas, a maior parte da população apresenta baixo padrão de vida, morando em locais sem infraestrutura básica de saneamento, estando vulneráveis a desastres ambientais.

A Figura 16 apresenta as áreas sujeitas a deslizamentos no município de Jaboatão dos Guararapes com informações de suscetibilidade e setores de risco. De modo geral, observa-se que as áreas suscetíveis a deslizamento estão concentradas, principalmente, na porção norte, nordeste, oeste e leste do município. No setor urbano, essas áreas com elevada suscetibilidade contribuíram com a setorização de locais que apresentam riscos a população. As regiões muito sujeitas a ocorrências de deslizamentos estão situadas nas Regionais de Jaboatão Centro, Cavaleiro, Curado e Guararapes.

As principais condições que tornam essas áreas favoráveis a deslizamentos estão associadas às características predominantes do terreno, onde se verifica a existência de formas de relevo com atributos de altura e declividade elevada que são extremamente impróprios para ocupação (PFALTZGRAFF, 2007). Além disso, a influência de fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos e os tipos de vegetação também estão associados com a análise da alta suscetibilidade em Jaboatão dos Guararapes.

As encostas densamente ocupadas se caracterizaram pela falta de preocupação com os aspectos intrínsecos naturais do terreno. A indução humana através de cortes e aterros nas encostas, a remoção da vegetação e lançamento de águas residuais acabam afetando as condições naturais da encosta, aumentando o grau de risco e expondo a população a elevados prejuízos não só materiais como também humanos (CPRM, 1996).

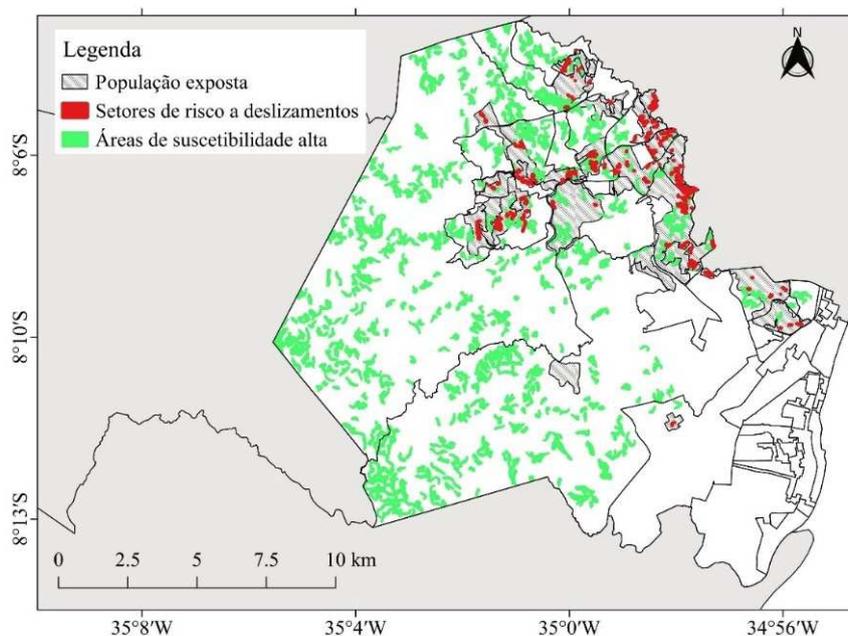


Figura 16. Áreas de suscetibilidade alta e setores de risco a deslizamentos em Jabotão dos Guararapes.

4.2 Ocorrências de deslizamentos e variabilidade espaço-temporal da chuva em Jabotão dos Guararapes

De 2016 a 2020 foram contabilizadas 88 ocorrências de deslizamentos em Jabotão dos Guararapes distribuídas nas 7 Regionais administrativas da cidade (Figura 17). A maioria dos deslizamentos ocorreu, preferencialmente, no período da manhã e tarde e a minoria durante a madrugada e noite (Anexo A). Observou-se que o maior número de deslizamentos ocorreu na Regional Jabotão Centro (35%) e na Regional Cavaleiro (31%) com 31 e 27 eventos, respectivamente (Figura 17b). A Regional de Guararapes, Prazeres e Curado apresentaram 15%, 9% e 8% dos registros de deslizamento, enquanto que as Regionais Muribeca e Praias tiveram apenas 2% do total de casos ocorridos. Em alguns casos houve registros de desabrigados e óbitos (Anexo A).

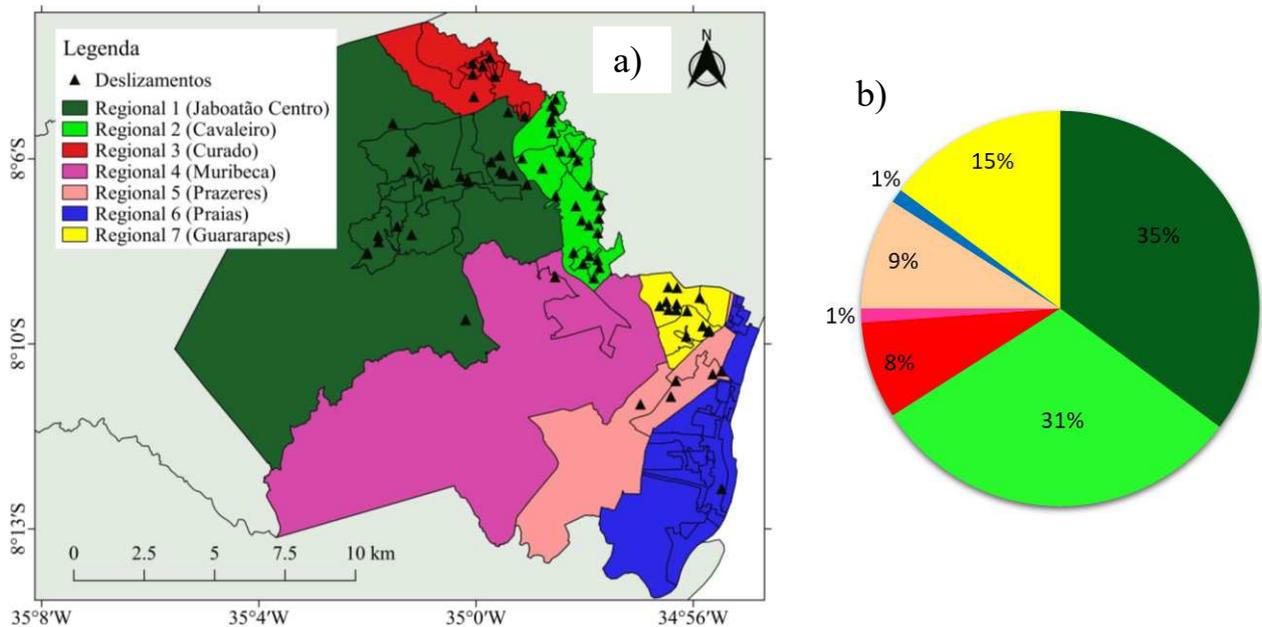


Figura 17. (a) Distribuição espacial e (b) percentual das ocorrências de deslizamentos nas 7 Regionais administrativas em Jabotão dos Guararapes.

A maior frequência de deslizamentos foi observada na parte norte, nordeste e leste do município que corresponde aos locais onde são encontradas áreas com altitude elevada, ocupadas principalmente por colinas, tabuleiros e morros (Figura 18). Essas áreas possuem altitude variando de 30 a 100 m, algumas vezes ultrapassando os 100 m ao norte e oeste do município. À parte ao sul de Jabotão dos Guararapes próximo ao litoral, caracteriza-se por áreas planas de baixa altitude, constituídas por planícies e terraços fluviais e marinhos, onde os casos de deslizamento foram verificados em menor quantidade (Figura 18).

Em relação a variabilidade espacial dos deslizamentos, nota-se que eles foram recorrentes na área urbana apresentando poucos casos na área rural (Figura 19). Além disso, a elevada concentração de deslizamentos nas proximidades do limite com o município de Recife também está relacionada com a forma de ocupação antrópica, caracterizada por inúmeras habitações de baixa renda localizadas em condições de terreno inadequadas.

Ao analisar a distribuição anual dos deslizamentos em Jabotão dos Guararapes verificou-se que o maior número de ocorrências foi registrado em 2017 com 32 eventos, enquanto que em 2016 foram verificados apenas 3 deslizamentos (Figura 19). As 53 ocorrências restantes se distribuíram em 7 casos em 2018, 27 casos em 2019 e 19 casos

em 2020. Nota-se que nos anos de 2017 e 2020 os deslizamentos foram distribuídos espacialmente em quase todas as zonas urbanas do município.

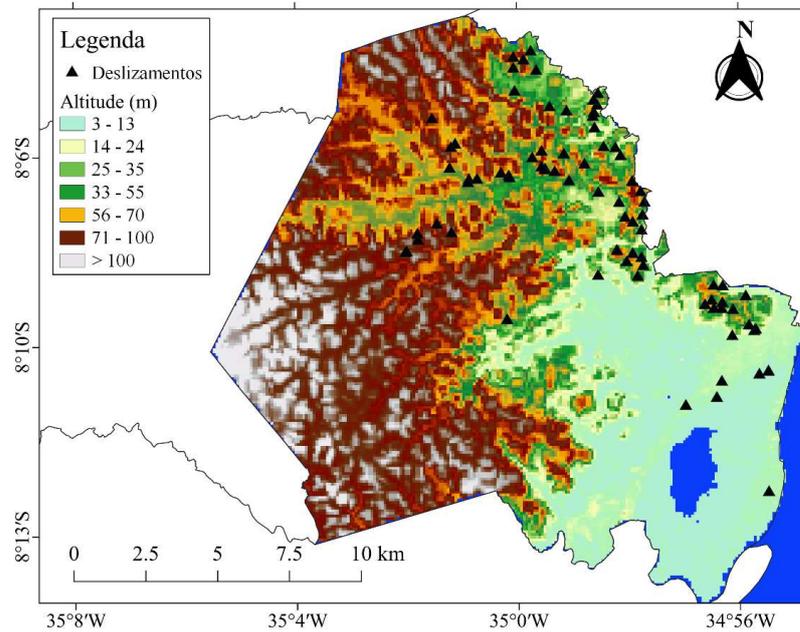


Figura 18. Mapa de altitude em metros associado com os casos de deslizamentos registrados em Jaboatão dos Guararapes.

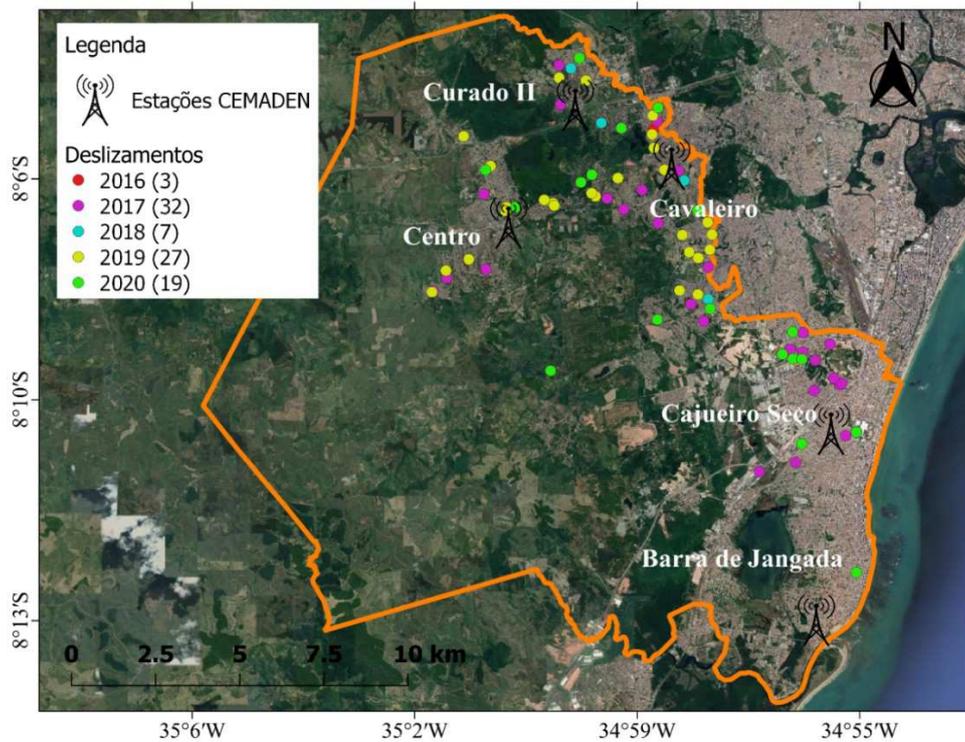


Figura 19. Total anual das ocorrências de deslizamentos entre 2016 e 2020 registrados em Jaboatão dos Guararapes juntamente com a localização de cinco estações de medição de precipitação.

De acordo com a frequência mensal das ocorrências de deslizamentos nas Regionais em Jabotão dos Guararapes, constata-se um predomínio de ocorrências no trimestre abril, maio e junho (Figura 20), sendo observadas 13 eventos em abril, 14 em maio e 46 em junho, durante o período de 2016 a 2020. As 15 ocorrências restantes se concentraram nos meses de janeiro (5), fevereiro (3), março (2) e julho (5). Em junho foram identificadas ocorrências em todas as Regionais do município, com destaque para as Regionais Cavaleiro, Centro e Guararapes que apresentaram 15, 14 e 10 ocorrências, respectivamente. Na Regional Centro foram registradas ocorrências em todos os meses, entre o período de janeiro a julho. Não foi observada nenhuma ocorrência de deslizamento nas Regionais entre agosto e dezembro durante o período analisado.

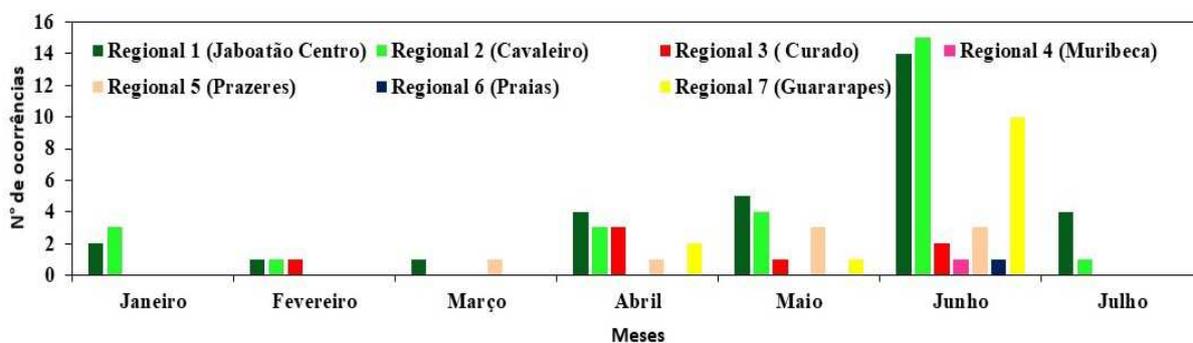


Figura 20. Frequência mensal da ocorrência de deslizamentos nas Regionais de Jabotão dos Guararapes no período de 2016 a 2020.

Observando o total mensal da precipitação obtida na estação pluviométrica do Centro com todos os deslizamentos que ocorreram no município, é possível perceber que a ocorrência de deslizamentos em Jabotão dos Guararapes está diretamente relacionada com o ciclo sazonal da precipitação na cidade (Figura 21). Nota-se que a maior frequência de deslizamentos foi observada no período chuvoso da CLNEB (abril a julho), coincidindo com os meses mais chuvosos do período entre janeiro de 2016 e dezembro de 2020. Com relação ao número de ocorrências, destacam-se junho de 2017, quando foram registrados 24 deslizamentos e 391,7 mm de precipitação, e junho de 2019, com 15 deslizamentos e um total de precipitação de 422,3 mm (Figura 21). Em junho de 2017 e 2019, as anomalias de precipitação foram de 86,0 e 116,6 mm acima da média esperada para o mês de junho (305,7 mm) conforme obtido por Coutinho *et al.* (2020).

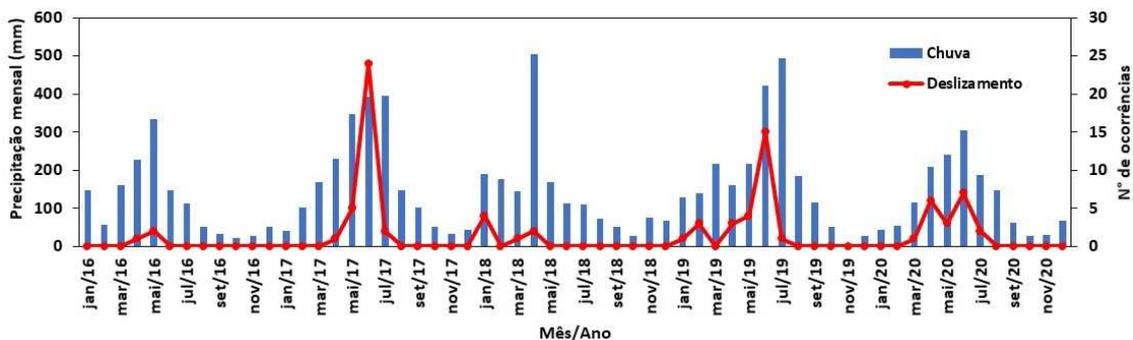


Figura 21. Total mensal da ocorrência de deslizamentos (linha) e precipitação (barras) no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2020 na estação pluviométrica do Centro em Jaboatão dos Guararapes.

A distribuição espacial da precipitação no período chuvoso mostrou que nos anos com maior número de ocorrências de deslizamentos (2017 e 2019), a precipitação acumulada entre abril e julho nas estações pluviométricas em Jaboatão dos Guararapes variou entre 1340 a 1560 mm em 2017 (Figura 22b) e 1220 a 1300 mm em 2019 (Figura 22d). Fazendo uma comparação com a média climatológica da estação chuvosa obtida por Coutinho *et al.* (2020) no período de 23 anos em Jaboatão dos Guararapes, observou-se que em 2017 e 2019, a precipitação esteve acima da média esperada para o período, que é de 989,5 mm.

Em relação aos anos que apresentaram poucos casos de deslizamentos (2016 e 2018), verificou-se que a precipitação acumulada na maioria das estações pluviométricas esteve abaixo ou próximo da média climatológica, exceto a estação de Barra de Jangada, que registrou 1064 mm no período chuvoso de 2016. De modo geral, a precipitação acumulada de abril a julho de 2020 esteve abaixo do esperado para a estação chuvosa (exceto na estação Cajueiro Seco), com destaque para a estação Cavaleiro que registrou 730 mm (Figura 22e). As ocorrências de deslizamentos em 2020 ficaram acima das registradas em 2016 e 2018, apesar das estações pluviométricas terem registrado chuvas abaixo da média climatológica.

As estações que registraram os maiores acumulados durante o período chuvoso em 2016, 2017 e 2018 foram Barra de Jangada e Curado II, enquanto que os menores valores foram registrados nas estações Cavaleiro e Centro. Em 2019 e 2020, o máximo de precipitação acumulada foi observada nas estações Centro e Cajueiro Seco, respectivamente. De acordo com a Figura 19, a estação Cavaleiro teve uma elevada

concentração de deslizamentos no seu entorno, mesmo registrando os menores acumulados de precipitação no período.

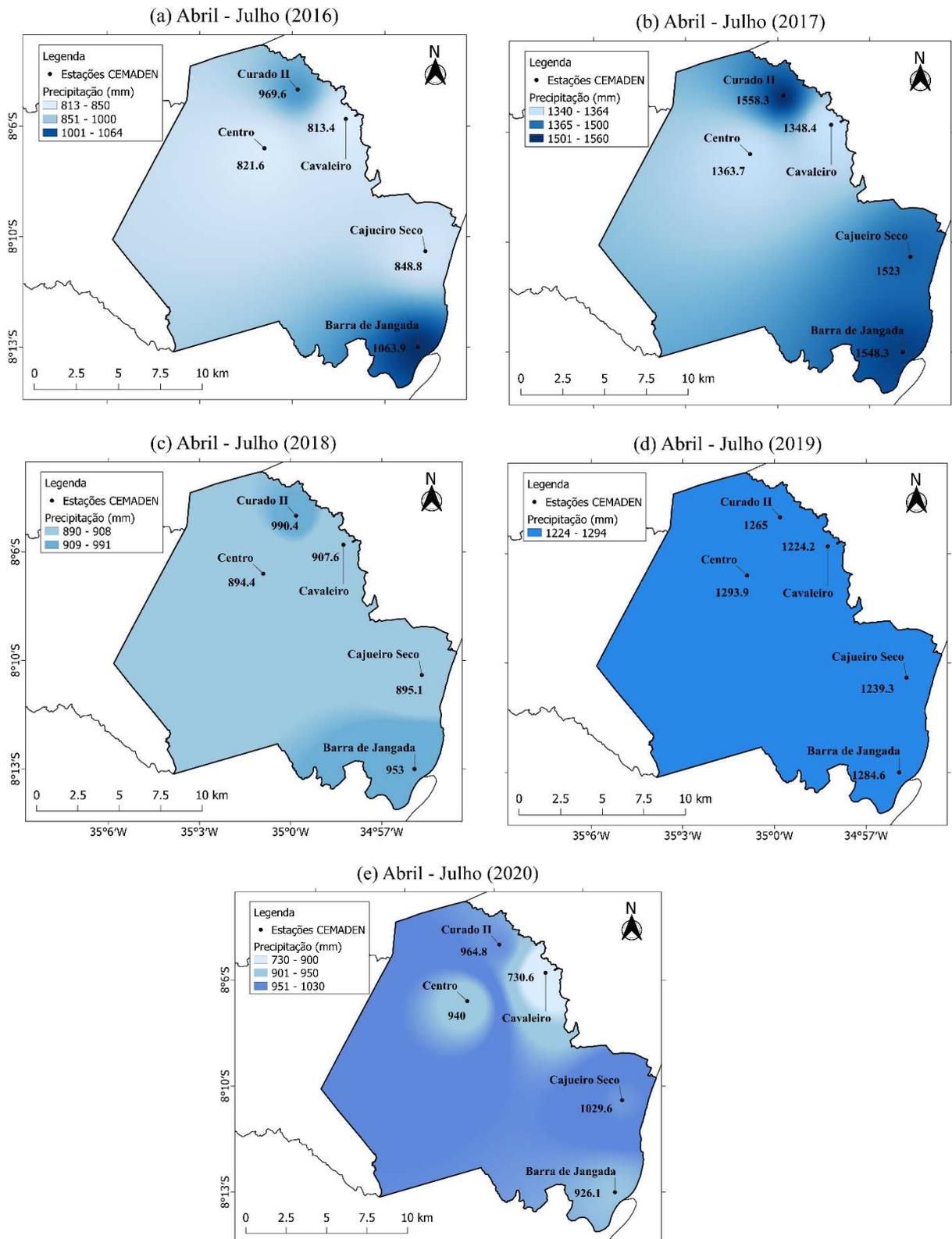


Figura 22. Distribuição espacial da precipitação no período chuvoso (abril – julho) no município de Jaboatão dos Guararapes entre 2016 a 2020.

Segundo informações apresentadas nos boletins climáticos mensais disponibilizados pela APAC de 2016 a 2020, as condições oceânicas na faixa equatorial do Oceano Pacífico mostraram uma situação de neutralidade em relação ao fenômeno ENOS na estação chuvosa entre o período de 2016 a 2020. No Atlântico Tropical Sul, houve maior predomínio de águas mais aquecidas em áreas adjacentes a CLNEB durante o período chuvoso de 2016 a 2020. Esse padrão de neutralidade do ENOS e águas mais aquecidas na CLNEB favoreceram o transporte de umidade do oceano para o continente, que contribuíram com episódios de chuva intensa e na ocorrência de deslizamentos ao longo do litoral pernambucano.

A Figura 23 apresenta os acumulados diários de precipitação responsáveis por causar as 88 ocorrências de deslizamentos na cidade de Jaboatão dos Guararapes entre o período de 2016 a 2020. Ao todo foram contabilizados 34 dias com deslizamentos que estiveram associados com a chuva (Figura 23).

Na maioria dos casos de deslizamentos, a precipitação acumulada ficou acima de 40 mm/dia em pelo menos uma estação pluviométrica localizada na cidade (Figura 23). A precipitação acumulada ficou abaixo de 10 mm/dia em todas as estações pluviométricas apenas em 4 dias (22/07/2017, 19/04/2020, 21/04/2020 e 18/07/2020) (Figura 23), neste caso, as ocorrências de deslizamentos foram associadas com a chuva que ocorreu nos dias anteriores (Figura 24).

Além disso, nos casos que foram registradas mais de 10 ocorrências de deslizamentos (29/06/2017 e 13/06/2019), a chuva diária ultrapassou os 100 mm. De modo geral, a distribuição das chuvas em Jaboatão dos Guararapes é altamente influenciada pela atuação de sistemas meteorológicos que podem ter duração de até 3 dias e gerar acumulados de chuva expressivos capazes de desencadear a ocorrência de deslizamentos, como por exemplo, os DOLs que foram frequentes durante o período analisado (Anexo B). Vale salientar que esses sistemas meteorológicos além de provocar eventos relacionados com deslizamentos, podem causar impactos sobre a sociedade através de alagamentos, inundações, queda de árvores e rompimento de açudes, resultando em danos materiais, e até mesmo perdas de vidas humanas.

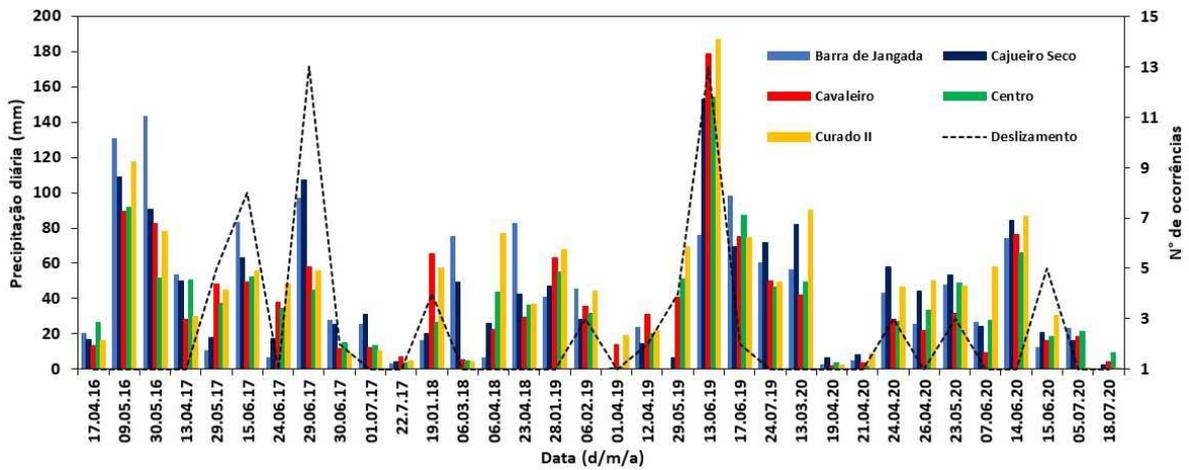


Figura 24. Acumulados diários de precipitação obtidos pelas estações pluviométricas de Jaboatão dos Guararapes para os dias com ocorrências de deslizamentos.

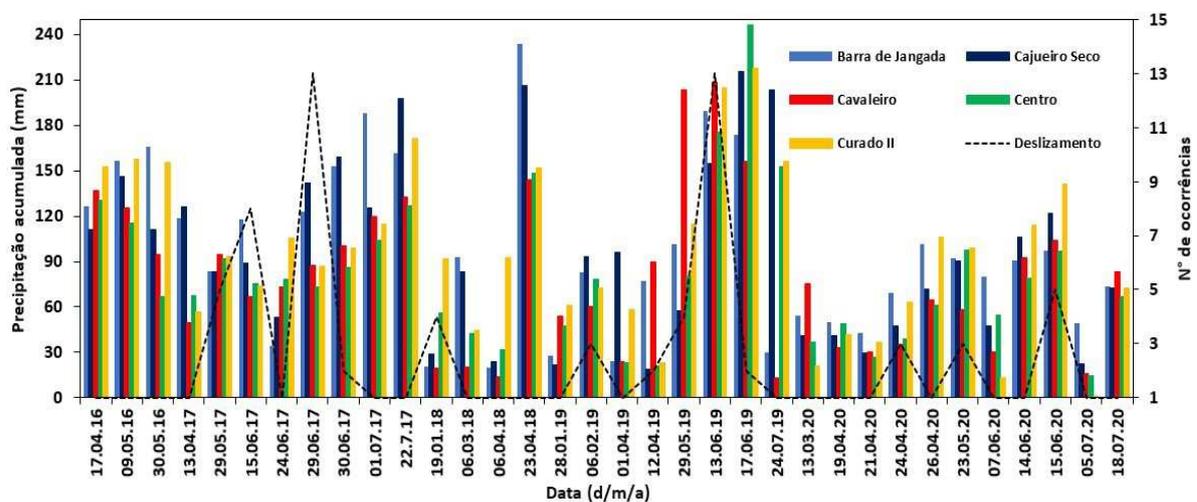


Figura 23. Acumulados de precipitação em 4 dias anteriores obtidos pelas estações pluviométricas de Jaboatão dos Guararapes para os dias com ocorrências de deslizamentos.

4.3 Relação dos dados pluviométricos e as ocorrências de deslizamentos

Após a análise das informações coletadas sobre os acumulados pluviométricos registrados pelas estações meteorológicas nos dias de ocorrências de deslizamentos em Jaboatão dos Guararapes, foi possível determinar a relação entre a precipitação e os deslizamentos. Inicialmente, foi realizada uma análise exploratória dos dados diários de precipitação através de estatísticas descritivas para conhecer as principais características do conjunto de dados utilizados e, em seguida, foi obtida a correlação dos dados diários entre todas as estações pluviométricas pelo fato dos 5 pluviômetros estarem localizados em diferentes distâncias.

Para o período de 2016 a 2020, foram identificadas 1827 observações nas estações pluviométricas, sendo registrados mais de 8.000 mm de chuva nos 5 pluviômetros

espalhados pela cidade, com o mínimo de 8.023,7 mm registrados na estação Cavaleiro e máximo de 9.456,8 mm na estação Curado II (Tabela 3). Além disso, a análise mostrou que o valor máximo de precipitação diária registrado nas estações foi superior a 140 mm e inferior a 190 mm (Tabela 3).

Observa-se que os valores da mediana são bem inferiores que os valores para a média, indicando que a distribuição dos dados tem curva assimétrica à direita, ou seja, assimetria positiva (>0), neste caso ocorre maior espalhamento à direita da média, em direção aos maiores valores observados (Tabela 3). Além disso, os valores de curtose (>0) também indicam que a distribuição entre as estações não é simétrica. Os valores aproximados de desvio padrão, média e variância indicam uma alta similaridade entre as estações.

Tabela 3. Estatísticas descritivas aplicadas para os dados diários de precipitação registrados nas estações pluviométricas de Jaboatão dos Guararapes.

Estatística	Barra de Jangada	Cajueiro Seco	Cavaleiro	Centro	Curado II
Nº de observações	1827	1827	1827	1827	1827
Máximo	145,6	152,9	178,9	154,1	186,8
Mediana	0,39	0,20	0,59	0,60	0,60
Soma	8.722,9	8.435,9	8.023,7	8.780,8	9.456,8
Média	4,8	4,6	4,4	4,8	5,2
Variância da amostra	161,6	139,8	107,4	111,5	143,8
Desvio-padrão	12,7	11,8	10,4	10,6	12,0
Assimetria	5,5	5,6	6,2	4,9	5,5
Curtose	39,9	43,8	63,6	38,2	48,3

Os resultados de similaridade mostraram que as estações pluviométricas apresentam boa correlação quando estão mais próximas, diminuindo a correlação entre ambas à medida que aumenta a distância (Tabela 4). Nas estações localizadas no setor norte, nordeste e leste do município, a correlação foi de 90% entre Curado II e Cavaleiro (~3 km de distância), de 87% entre Curado II e Centro (~4 km de distância) e de 86% entre Cavaleiro e Curado II que estão a uma distância de aproximadamente 5 km.

A correlação foi de 89% para os pluviômetros que estão próximos do litoral (Barra de Jangada e Cajueiro Seco), localizados a uma distância de cerca de 6 km entre eles (Figura 19). A menor correlação (73%) foi observada entre as estações que estão mais afastadas na área de estudo (Curado II e Barra de Jangada), com distância acima de 10

km. De modo geral, o intervalo de 0,73 a 0,90 nos valores de correlação indicaram uma forte correlação entre os dados diários de precipitação registrados em Jaboatão dos Guararapes entre 2016 a 2020 (Tabela 4).

Durante todo o período foram observados 1034 dias com chuva e 284 eventos de chuva na estação pluviométrica Barra de Jangada, 1004 dias com chuva e 280 eventos de chuva em Cajueiro Seco, 1107 dias com chuva e 291 eventos de chuva em Cavaleiro, 1129 dias com chuva e 272 eventos de chuva no Centro e 1142 dias com chuva e 266 eventos de chuva na estação pluviométrica Curado II.

Tabela 4. Correlação aplicada para as cinco estações pluviométricas em Jaboatão dos Guararapes.

Estação	Barra de Jangada	Cajueiro Seco	Cavaleiro	Centro	Curado II
Barra de Jangada	1	0,89	0,76	0,76	0,73
Cajueiro Seco	0,89	1	0,84	0,81	0,80
Cavaleiro	0,76	0,84	1	0,86	0,90
Centro	0,76	0,81	0,86	1	0,87
Curado II	0,73	0,80	0,90	0,87	1

Neste estudo, os limiares pluviométricos foram estabelecidos para avaliar a relevância da chuva para os eventos de deslizamentos registrados em Jaboatão dos Guararapes, usando a relação entre a quantidade de chuva acumulada do evento e a sua duração (ED) (Figura 25) e a intensidade da chuva e a duração (ID) (Figura 26). Ao todo foram identificados 34 eventos de chuva que resultaram em 88 ocorrências de deslizamentos, mostrando que em alguns casos apenas um único evento de chuva foi responsável por mais de uma ocorrência na cidade.

Os limiares ED e ID mostraram que eventos de chuva de curta e longa duração favorecem a ocorrência de deslizamentos em Jaboatão dos Guararapes (Figuras 25 e 26), sendo a maior constância observada em períodos mais curtos ($D \leq 10$ dias) para eventos de chuva acima do limiar. Essa observação indicando a melhor associação de períodos curta duração com a ocorrência de deslizamentos, teve resultado semelhante para diferentes áreas sujeitas a deslizamentos em outras regiões, demonstrando que uma chuva acumulada de 3 dias é suficiente para causar instabilidade (HADER, 2021; LEE *et al.*, 2021).

Analisando o gráfico ED, verificou-se que a precipitação acumulada dos eventos de deslizamentos acima do limiar variou entre 80 a 900 mm (Figura 25), onde as maiores quantidades de chuva acumulada foram observadas em eventos com maior duração. A maior quantidade de precipitação acumulada durante um caso de deslizamento foi de 920,0 mm, em um período de 59 dias anteriores a ocorrência. No caso do evento de menor duração, foi registrada uma precipitação acumulada de 120,0 mm em 2 dias. Com relação ao limiar ID, verifica-se que os casos de deslizamentos com maior duração apresentaram menores valores de intensidade, em relação aos eventos com uma duração mais curta (Figura 26). Além disso, os intervalos de intensidade acima do limiar foram de 15,0 a 62,0 mm/dia, sendo observado o intervalo próximo a 20 mm/dia o que mais contribuiu com as ocorrências de deslizamentos.

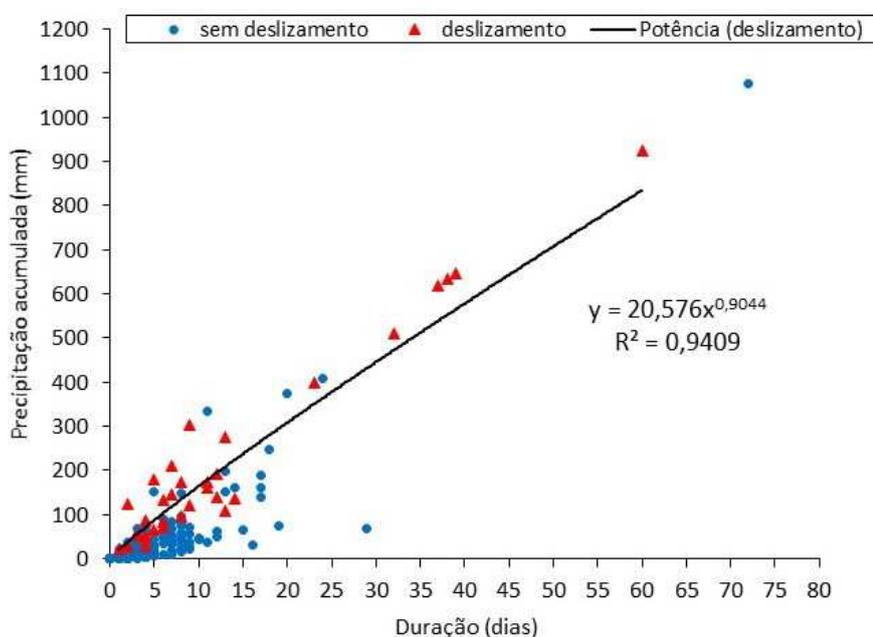


Figura 25. Limiar pluviométrico ED a partir de dados diários de precipitação para o município de Jabotão dos Guararapes. Os pontos azuis representam as chuvas que não causaram deslizamentos e os vermelhos as chuvas que tiveram relação com deslizamentos.

Em ambas as análises as curvas de limiar demonstraram desempenho semelhantes, no entanto, os dados se ajustaram melhor para a relação entre a quantidade de chuva acumulada e a duração (ED), evidenciado pelo R^2 de 0,94 (Figura 25), indicando que 94% da variação dos valores de precipitação acumulada são explicados pela variação dos valores de duração, ou seja, a correlação entre essas duas variáveis é altamente significativa. De acordo com GARIANO *et al.* (2020), o desempenho satisfatório dos limiares ED ocorre pelo fato que as duas variáveis não são dependentes uma da outra, ao

contrário dos limiares ID, em que a intensidade da chuva depende da duração da chuva. É possível observar pontos abaixo do limiar que estiveram associados com os deslizamentos, neste caso, outros fatores podem ter contribuído com a ocorrência, como sistemas de esgotamento sanitário e vazamento de água no talude.

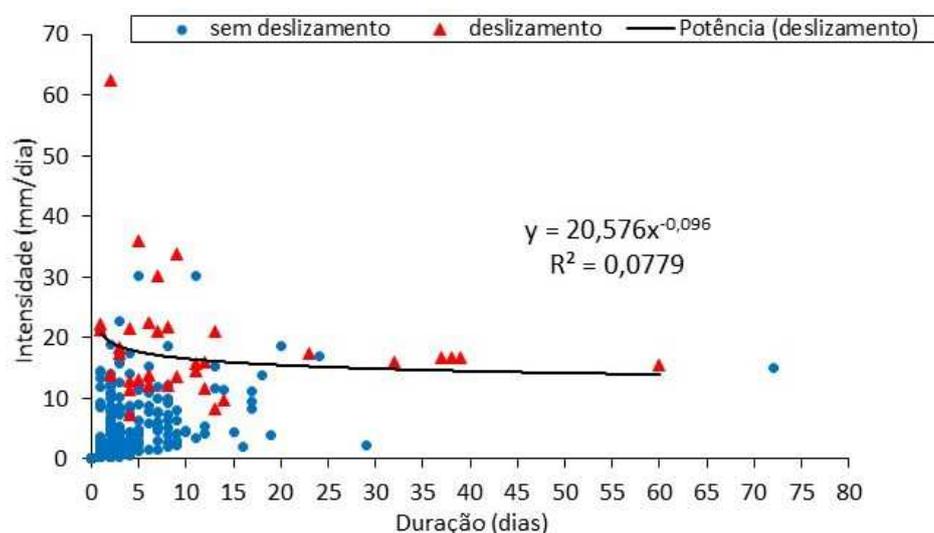


Figura 26. Limiar pluviométrico ID a partir de dados diários de precipitação para o município de Jaboatão dos Guararapes. Os pontos azuis representam as chuvas que não causaram deslizamentos e os vermelhos as chuvas que tiveram relação com deslizamentos.

Através do horário da ocorrência dos deslizamentos (Anexo A), foi possível determinar as condições anteriores de chuva que, provavelmente, resultaram nos deslizamentos, para isso foi analisada a precipitação acumulada antecedente de 24, 48, 72 e 96 horas nos dias que ocorreram os deslizamentos, apresentados na forma de *boxplots* (Figura 27).

Os resultados demonstraram que para a chuva antecedente de 24h, os acumulados de precipitação apresentaram variabilidade entre 20,4 a 55,9 mm, representadas pelo primeiro quartil (Q1) e terceiro quartil (Q3), respectivamente (Figura 27). A tendência central, representada pela mediana (Q2) apresentou um valor de 43,5 mm, enquanto que os valores mínimo e máximo corresponderam a 3,7 mm e 98,7 mm, respectivamente. Para 48h, os acumulados de precipitação variaram entre 29,5 a 89,1 mm, com mediana de 57 mm, valor mínimo de 6,1 mm e máximo de 146 mm.

Observando os acumulados de precipitação para o período de 72h, nota-se uma variabilidade de 32,9 mm para Q1 e de 100 mm para Q3, sendo a mediana, valor mínimo e máximo correspondente a 72,9 mm, 8,1 mm e 153,1 mm, respectivamente. Os valores

acumulados para 96h variaram de 45,3 mm até 109,5 mm, com mediana de 76,9 mm e valores mínimo e máximo de 16,2 mm e 189,1 mm, respectivamente (Figura 27). Na Figura 27, também pode-se observar dois valores extremos (109,2 e 136,8 mm) para os acumulados de 24h e um valor extremo (215,5 mm) para os acumulados de 96h. O período de 24h apresentou a menor variabilidade dos acumulados de precipitação, conseqüentemente a menor dispersão, representado pelo intervalo interquartílico de 35,5 mm (Q3-Q1), enquanto que a maior variabilidade e dispersão dos acumulados de precipitação foi verificada no período de 72h com intervalo interquartílico de 67,1 mm. Além disso, nota-se que a linha de mediana no período de 24h e 72h está um pouco afastada do centro da caixa, mostrando que ambos períodos apresentam assimetria.

Nos quatro períodos foi observado uma distribuição heterogênea de dados, em que os deslizamentos foram ocasionados tanto por valores baixos como por valores altos de precipitação acumulada antecedente. Neste caso, podemos definir o limiar da precipitação antecedente a partir de Q3, que separa 75% das observações iguais ou abaixo de seu valor.

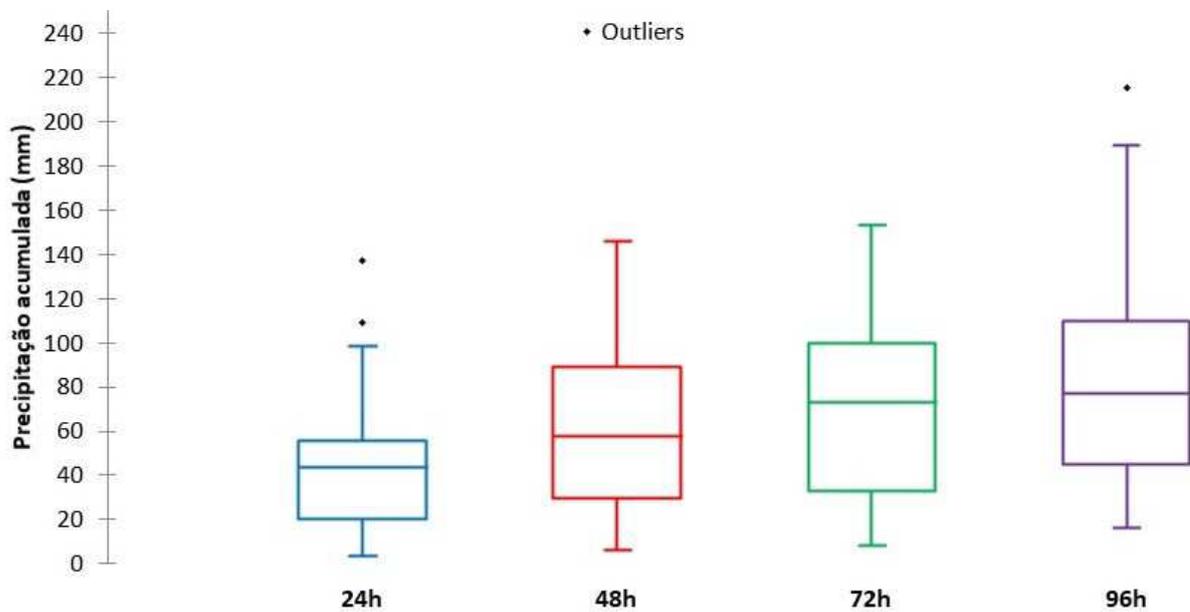


Figura 27. Precipitação acumulada antecedente para os dias de ocorrência de deslizamentos em Jaboatão dos Guararapes no período de 24h, 48h, 72h e 96h.

A partir de diferentes pesquisas, foi constatado que a precipitação acumulada para o período de 3 dias tem bastante relevância com a deflagração de deslizamentos (IDE & MACEDO, 2005; BANDEIRA & COUTINHO, 2015; LEE *et al.*, 2015; HADER, 2021),

assim foi analisado o intervalo de chuva acumulada antecedente de 72h que resultou em deslizamentos em cada uma das 7 Regionais distribuídas em Jabotão dos Guararapes (Figura 28).

A Figura 28a mostrou que 80% dos deslizamentos (25) na Regional 1 (Jabotão Centro) foram causados pela precipitação acumulada antecedente acima de 60,1 mm em 3 dias anteriores, com maior concentração de deslizamentos sendo observado no intervalo de 60,1 a 80 mm. Nessa Regional, alguns deslizamentos tiveram relação com intervalos de chuva muito baixo (<20 mm), assim como intervalos de chuva muito alto (>150 mm), em que 1 deslizamento foi causado por intervalo de chuva abaixo de 20 mm e 8 deslizamentos foram causados em um intervalo acima de 150 mm (Figura 28a).

A maioria dos deslizamentos (12) na Regional 2 (Cavaleiro), ocorreram com precipitação acumulada entre o intervalo de 80,1 a 100 mm em 3 dias anteriores (Figura 28b). Na Regional Cavaleiro foram observados 6 deslizamentos com precipitação acumulada antecedente acima de 100,1 mm e 6 deslizamentos com precipitação acumulada abaixo de 40 mm.

Dos 7 deslizamentos que ocorreram na Regional 3 (Curado), 4 foram relacionados com o intervalo de 60,1 a 80 mm em 72h (Figura 28c), enquanto os 3 restantes tiveram precipitação acumulada de 114,4 mm, de 59,6 mm e 34,6 mm. O deslizamento observado na Regional Muribeca registrado no bairro de Marcos Freire e o deslizamento registrado em Candeias na Regional Praias (Anexo A) tiveram precipitação acumulada antecedente acima de 80 mm (Figura 28d e Figura 28f). Esses dois deslizamentos foram causados pelo mesmo evento de chuva registrado em 15 de junho de 2020 (Anexo A), em que foram observados acumulados de chuva de 92,2 mm na Regional 7 e 99,7 mm na estação pluviométrica mais próxima do deslizamento observado em Marcos Freire.

Os intervalos de chuva antecedente encontrados na Regional 5 (Prazeres) e Regional 7 (Guararapes) são oriundos da mesma estação pluviométrica (Cajueiro Seco), devido à proximidade dos casos de deslizamentos. Na Regional Prazeres, os 8 deslizamentos foram verificados entre o intervalo de 60,1 a 150 mm de precipitação acumulada em 3 dias anteriores (Figura 28e), enquanto que na Regional 7 a maior concentração de deslizamentos (9) foi resultante pela precipitação acumulada acima de 100,1 mm (Figura 28g).

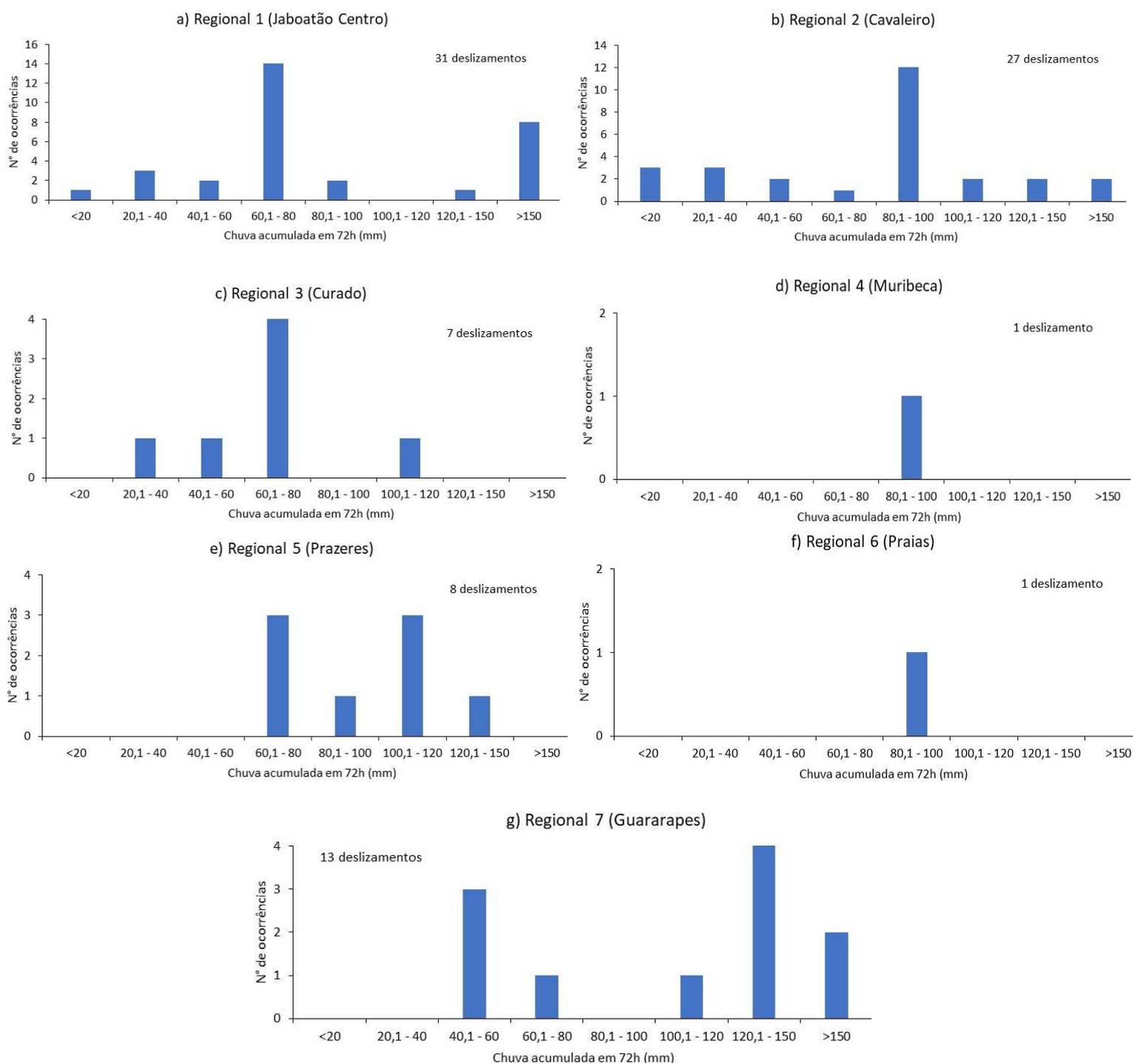


Figura 28. Intervalo de precipitação acumulada antecedente em 72 horas para os casos de deslizamentos registrados em cada Regional distribuída em Jabotão dos Guararapes. a) Regional Jabotão Centro, b) Cavaleiro, c) Curado, d) Muribeca, e) Prazeres, f) Praias e g) Guararapes.

4.4 Estudo de caso – maio de 2017

O estudo de caso empregado neste estudo está relacionado ao evento de chuva intensa ocorrido no leste do NEB em maio de 2017, que atingiu diversos municípios da CLNEB, principalmente nos estados de Alagoas e Pernambuco, e que trouxe consequências drásticas para a população, como mortes, deslizamentos, destruição de moradias, alagamentos, além de rompimento de açudes (CPTEC, 2020). No período de oito dias, de 24 a 31 de maio, foram registrados 74 deslizamentos na CLNEB, 1 na Paraíba, 5 em Alagoas e 68 em Pernambuco (Figura 29).

As ocorrências foram observadas em 16 municípios, 1 na Paraíba, 3 em Alagoas e 12 em Pernambuco. Em 10 cidades (Barra de Guabiraba/PE, Escada/PE, Gameleira/PE, Jaqueira/PE, João Pessoa/PB, Palmares/PE, Recife/PE, Rio Formoso/PE, Satuba/AL e Sirinhaém/PE) foram registrados apenas uma ocorrência de deslizamento, 2 casos em Maceió/AL e Maragogi/AL, 4 em Barreiros/PE, 5 em Cortês/PE e Jaboatão dos Guararapes/PE e 46 ocorrências de deslizamento em Ipojuca/PE.

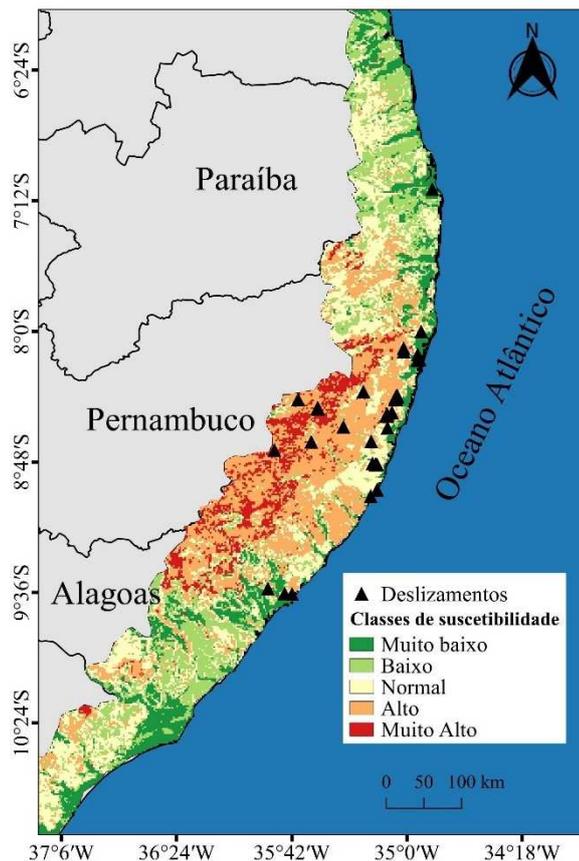


Figura 29. Registros de deslizamentos em municípios de Alagoas, Paraíba e Pernambuco entre os dias 24 a 31 de maio de 2017, juntamente com o recorte do mapa de suscetibilidade a deslizamentos do IBGE.

Dessa forma, sabendo que a precipitação pode atuar como um mecanismo deflagrador para ocorrências de deslizamentos e desastres na CLNEB, torna-se essencial aprofundar o entendimento das condições atmosféricas que podem auxiliar na melhoria da previsibilidade desse fenômeno. Analisando as condições atmosféricas durante a ocorrência desse evento, observou-se condições de instabilidade desde o dia 23/05 através das imagens no canal infravermelho do satélite GOES-16 (Figura 30), em que se nota uma extensa banda de nebulosidade no oceano até a costa dos estados de Alagoas e Sergipe (Figura 30a). No Estado de Alagoas foi observado valores abaixo de 240 W m^{-2} no campo de ROL, indicando a presença de convecção (Figura 31a). As estações de Maceió e Satuba registraram acumulados de precipitação diária de 22,4 mm e 25,8 mm, respectivamente (Tabela 5).

Apesar de observar que houve uma diminuição das áreas de nebulosidade com topo frio no dia 24/05 (Figura 30b), a convecção permaneceu ativa associada a presença de nuvens quentes (PALHARINI & VILA, 2017) que atuaram na região e causaram acumulados significativos de chuva estratiforme, que também pode ser confirmada na imagem de satélite com cores na escala de cinza claro. O radar de Maceió mostrou valores de refletividade de cerca de 40 dBZ (Figura 32a), indicando intensidade moderada de chuva. Neste dia, em Maceió foi observado um total diário de 90,4 mm de chuva, sendo notificada uma ocorrência de deslizamento (Tabela 5).

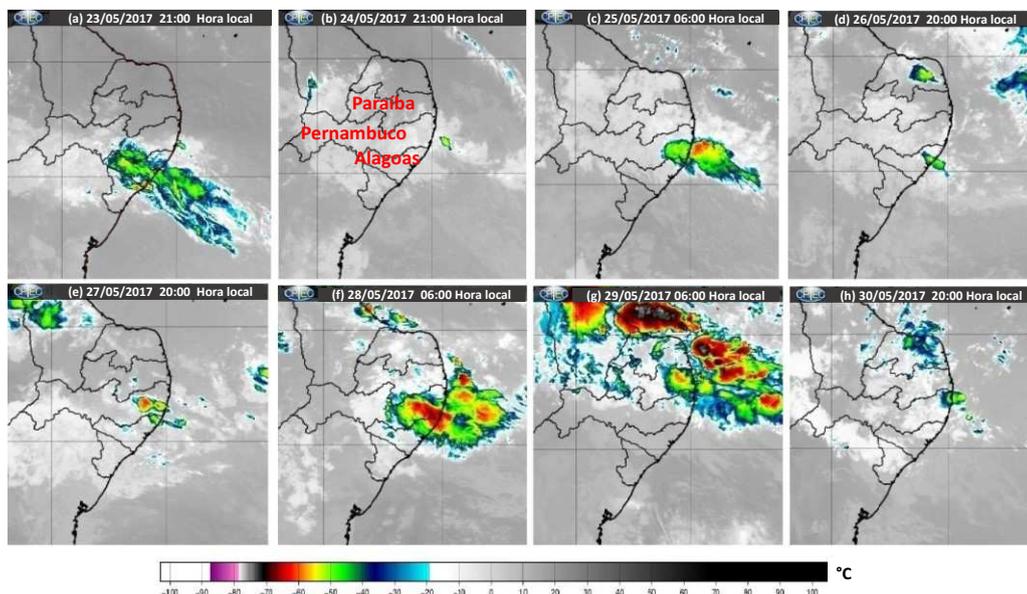


Figura 30. Imagens do satélite GOES-16, no canal infravermelho e realçadas para o período de 23 a 30 de maio de 2017 na CLNEB durante a atuação do sistema precipitante.

Na manhã do dia 25/05 (06:00 Hora Local) houve uma intensificação da nebulosidade convectiva com topo de nuvens de cerca de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ no litoral de Pernambuco (Figura 30c). A convecção permaneceu ativa durante todo o dia, pois a noite foi observada uma extensa área com nuvens com topo muito frio sobre o continente. Em alguns municípios, a precipitação diária ficou acima de 50 mm, como na cidade de Barreiros que registrou 78,4 mm e 4 casos de deslizamentos. Nos dias 26 e 27/05 (Figuras 30d e 30e) o sistema convectivo se enfraqueceu, no entanto, verificou-se valores significativos de chuva em algumas localidades (Tabela 5).

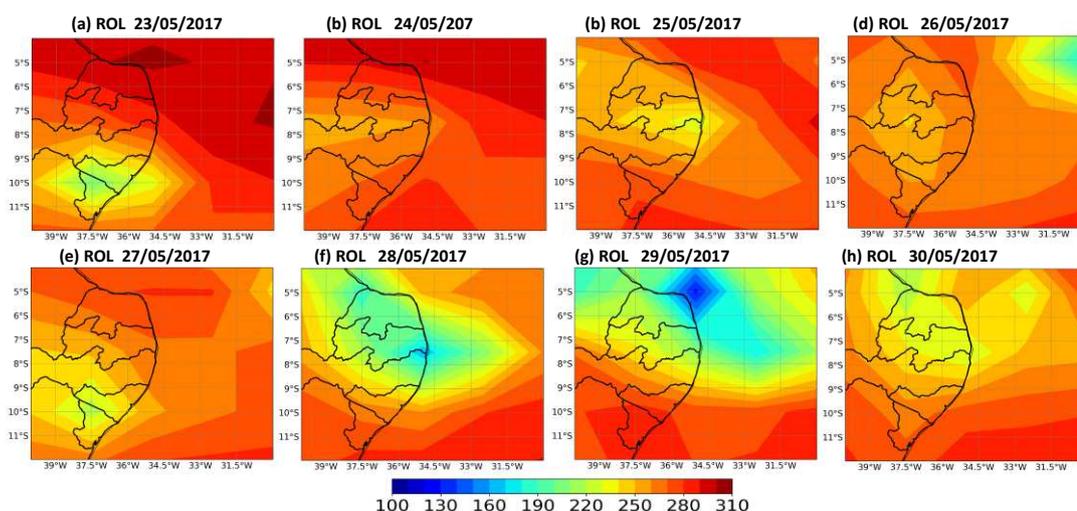


Figura 31. Campos de ROL (W m^{-2}) para o período de 23 a 30 de maio de 2017 na CLNEB durante a atuação do sistema precipitante.

A partir do dia 28/05 a nebulosidade voltou a se intensificar com o aumento espacial das áreas de convecção sobre o litoral de Pernambuco e Paraíba (Figura 30f). Os baixos valores de ROL ($< 200\text{ W m}^{-2}$) indicaram a presença de convecção atmosférica profunda com refletividade de 45 dBZ (Figura 32c) que contribuiu com a precipitação elevada sobre as cidades de Pernambuco, sendo registrado valores acima de 100 mm em 10 municípios (Tabela 5). Além disso, o dia 28/05 foi considerado o mais alarmante em termos de deslizamentos no Estado de Pernambuco, sendo a cidade de Ipojuca a mais afetada.

Nos dias seguintes (29 e 30/05) houve um deslocamento da convecção para o norte da CLNEB (Figura 30g e Figura 30h), resultando em altos índices pluviométricos no Estado da Paraíba que originou um deslizamento no dia 29 em João Pessoa (Tabela 5). Próximo ao litoral da Paraíba foram observados valores de 45 dBZ (Figura 32d) que correspondem a intensidade de chuva moderada a forte. Entretanto, em grande parte dos municípios da CLNEB houve diminuição considerável da precipitação e os deslizamentos

continuaram ocorrendo (Tabela 5). Essa situação mostra que os deslizamentos também podem estar relacionados com os acumulados de chuva dos dias anteriores que influenciaram nos processos de instabilidade do solo (MENDES *et al.*, 2015; METODIEV *et al.*, 2018).

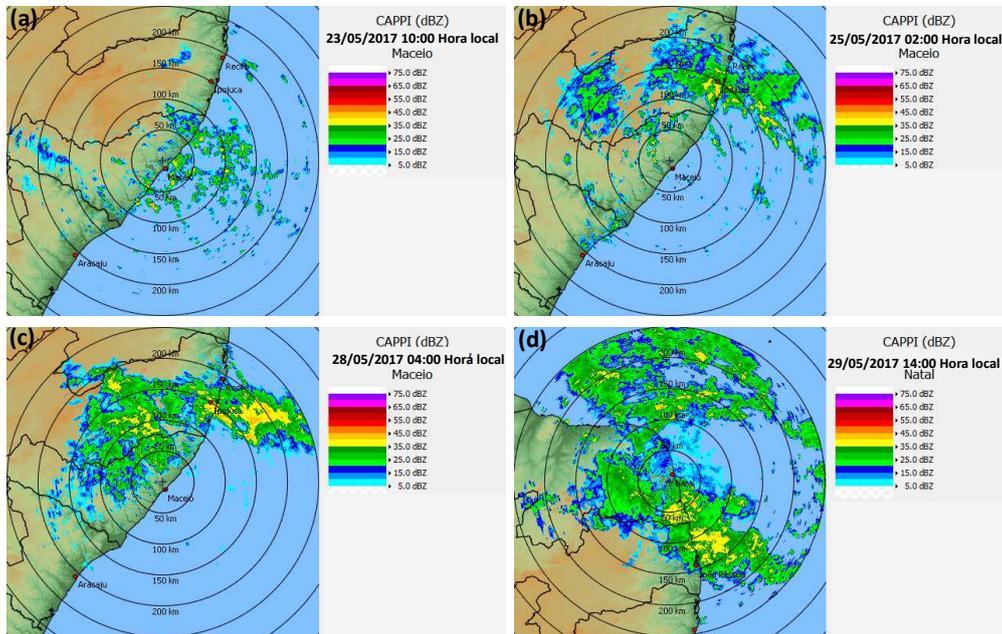


Figura 32. Refletividade dos radares meteorológicos de Maceió (a,b,c) e Natal (d) utilizando o produto CAPPI de 3 km para os dias (a) 24/05, (b) 25/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.

No início da atividade convectiva na CLNEB foram identificadas áreas com movimento vertical ascendente sobre o oceano Atlântico ($\sim 9^\circ \text{ S } 32^\circ \text{ W}$; $11^\circ \text{ S } 36^\circ \text{ W}$) em 500 hPa (Figura 33b). Nesta área, a proximidade de linhas de corrente do vento em 850 hPa, mostraram que o escoamento ficou acelerado em direção ao continente (Figura 33b). Nos dias 28/05 e 29/05 as regiões de movimento ascendente se intensificaram sobre o oceano adjacente, onde as áreas de convecção se concentraram entre as latitudes de 10° N a 6° S (Figura 33c e Figura 33d). Além disso, o escoamento do vento acelerado pode ter favorecido um aumento no transporte de umidade que se concentrou sobre o continente, o que contribuiu para a instabilidade nos últimos dias de ocorrência da chuva (Figura 35).

As áreas de instabilidade na superfície foram associadas com a divergência do vento em altos níveis (Figura 34). É possível observar que a CLNEB estava tomada por regiões de ascendência de ar e divergência nos níveis elevados, onde nos dias 23/05 e 24/05, houve um escoamento difluente do vento em 200 hPa através do alongamento das linhas de corrente (Figuras 34a e 34b).

Tabela 5. Acumulados de precipitação diária (mm) registrados pelos pluviômetros do CEMADEN no período de 24 a 31 de maio de 2017. Valores entre parêntese correspondem aos eventos de deslizamentos.

Município	23/5	24/05	25/05	26/05	27/05	28/05	29/05	30/05	31/05	Total (mm)
Barra de Guabiraba	7,2	13,0	53,6	8,5	73,8	169,6 (1)	3,8	1,6	8,0	331,9
Barreiros	12,1	39,0	78,5 (4)	22,0	78,2	121,3	1,6	1,4	40,4	382,4
Cortês	5,3	17,9	52,9	14,8	99,9	158,0 (5)	2,6	1,8	21,2	369,0
Escada	7,7	41,7	32,2	10,1	51,8	120,2 (1)	3,6	0,4	46,8	307,4
Gameleira	6,5	20,7	67,2	15,4	99,9	221,8 (1)	0,2	4,5	32,1	461,8
Ipojuca	10,2	70,9	42,6	7,9	36,6	182,0 (10)	4,6 (14)	2,4 (12)	59,5 (9)	406,5
Jaboatão dos Guararapes	0	21,9	22,6	0,6	25,7	38,0	45,1 (5)	1,8	103,4	259,1
Jaqueira	1,4	19,9	38,0	14,0	53,9	144,5 (1)	2,6	6,1	9,7	288,7
João Pessoa	0	0	0	0	0	18,4	126,2 (1)	4,8	2,4	151,8
Maceió	22,4	90,4 (1)	23,4	112,2	82,4	54,2 (1)	0,8	6,8	25,6	395,8
Palmares	3,4	19,4	44,3	16,4	74,3	130,5 (1)	2,4	2,6	12,5	302,4
Recife	1,0	9,5	17,9	1,0	9,2	38,0	51,5	3,6	66,2 (1)	203,2
Rio Formoso	21,1	29,6	99,8	25,0	94,3	298,3 (1)	5,4	0,8	60,3	613,8
Satuba	25,8	84,5	24,9	136,5	106,6 (1)	20,4	1,4	7,3	45,6	453,0
Sirinhaém	20,4	61,1	57,9	13,2	23,4	288,2 (1)	3,7	6,9	66,2	520,6

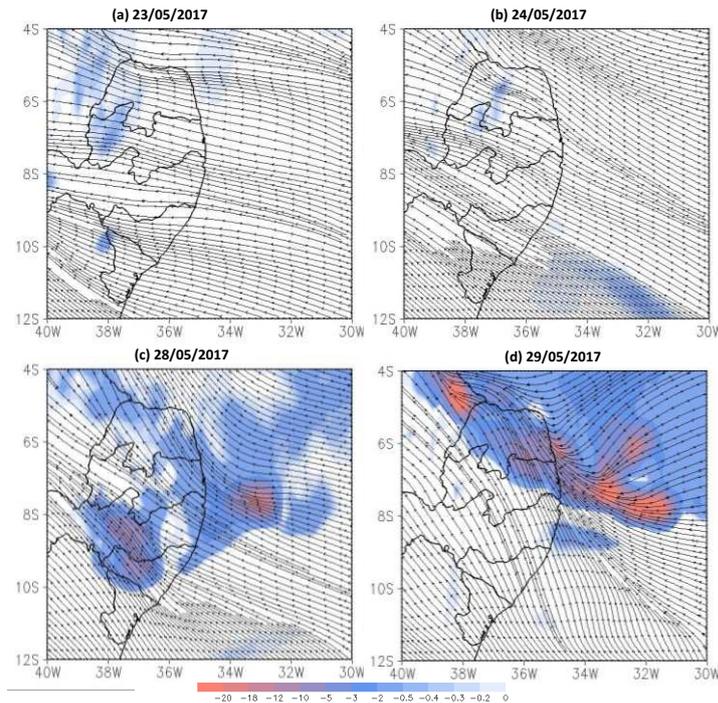


Figura 33. Campos médios diários de velocidade vertical (sombreado) no nível vertical de 700 hPa (Pa s^{-1}) e escoamento médio do vento em linha de corrente no nível de 850 hPa (m s^{-1}). As informações correspondem aos dias (a) 23/05, (b) 24/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.

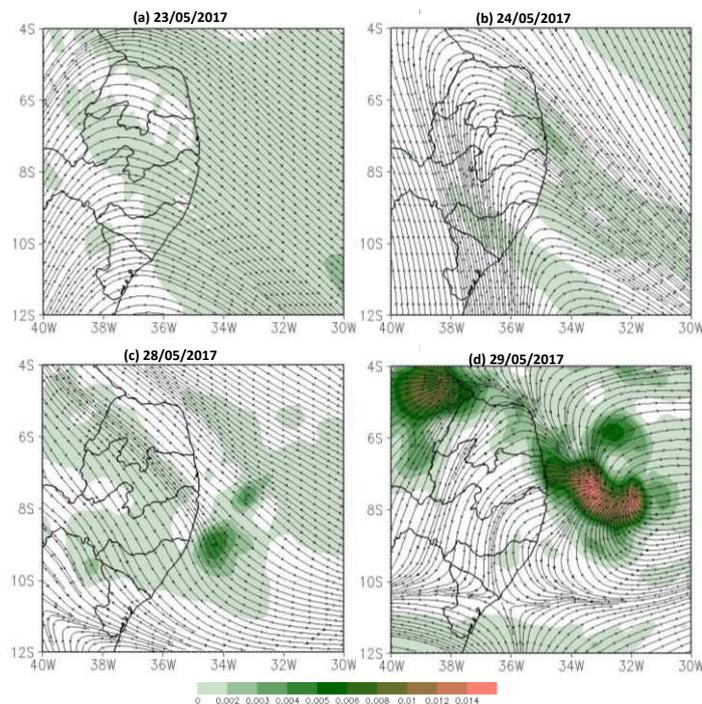


Figura 34. Campos médios diários de divergência do vento (sombreado) no nível vertical de 200 hPa (m s^{-1}) e escoamento do vento em linha de corrente no nível de 200 hPa. As informações correspondem aos dias (a) 23/05, (b) 24/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.

Além disso, observou-se que os núcleos de divergência em altos níveis se intensificaram, principalmente nos dias 28/05 e 29/05 (Figuras 34c e 34d) em consequência dos movimentos ascendentes de ar úmido na superfície. Este padrão de divergência em altos níveis mostra que a circulação atmosférica na CLNEB foi favorecida pela convergência do fluxo de umidade próximo da superfície (Figuras 35c e 35d), que resultou em acumulados significativos de chuva durante a atuação do sistema precipitante.

De modo geral, a condição meteorológica que se formou na CLNEB durante o período de 23/05 a 31/05, tendo como consequência diversos casos de deslizamentos, foi ocasionada pelo aumento da convergência do fluxo de umidade oceânica em baixos níveis, que favoreceu o levantamento de ar úmido para a formação de nuvens convectivas e, conseqüentemente, para os elevados índices de precipitação. Esses resultados mostraram que eventos de chuva intensa como este que ocorrem na CLNEB, nem sempre podem ser originados a partir de sistemas meteorológicos de meso ou grande escala que atuam na região (GOMES *et al.*, 2015; NEVES *et al.*, 2016; FERREIRA & SOUZA, 2019), pois características relacionadas ao outono e inverno austral, como a intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul, a convergência dos ventos alísios e a convecção diurna podem servir de mecanismos para a formação de nuvens de tempestade ao longo da costa litorânea (REBOITA *et al.*, 2019; GILLILAND *et al.*, 2017).

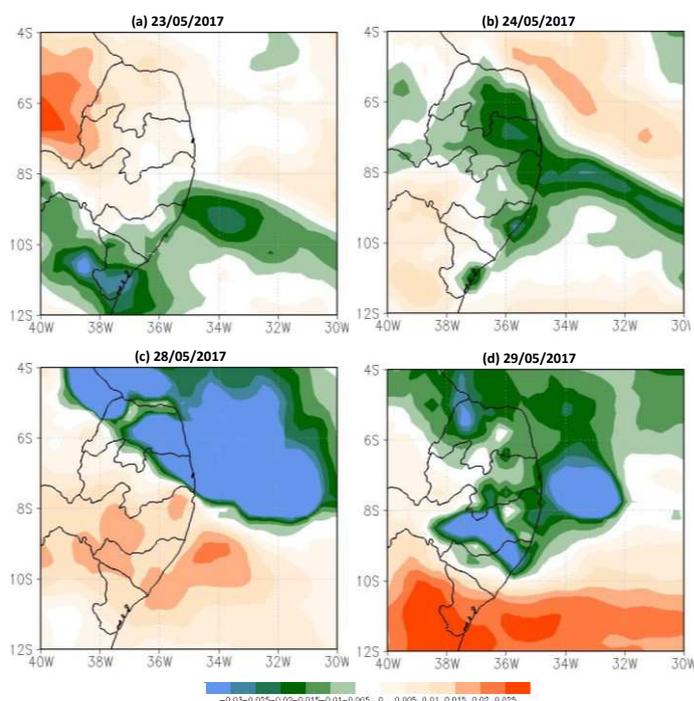


Figura 35. Campos médios diários de Convergência do Fluxo de Umidade Verticalmente Integrado ($\text{Kg m}^{-2}\text{s}$). As informações correspondem aos dias (a) 23/05, (b) 24/05, (c) 28/05 e (d) 29/05.

4.4.1 Análise da chuva via modelagem numérica

Os resultados com relação a espacialização da chuva na CLNEB foram avaliados através da simulação com modelo regional RegCM, dos quais foram comparados com a chuva estimada pelo algoritmo 3B42v7 do satélite TRMM, que correspondem aos dados observacionais que foram acumulados no período de 23 a 26/05 (Figura 36) e de 27 a 30/05 (Figura 37).

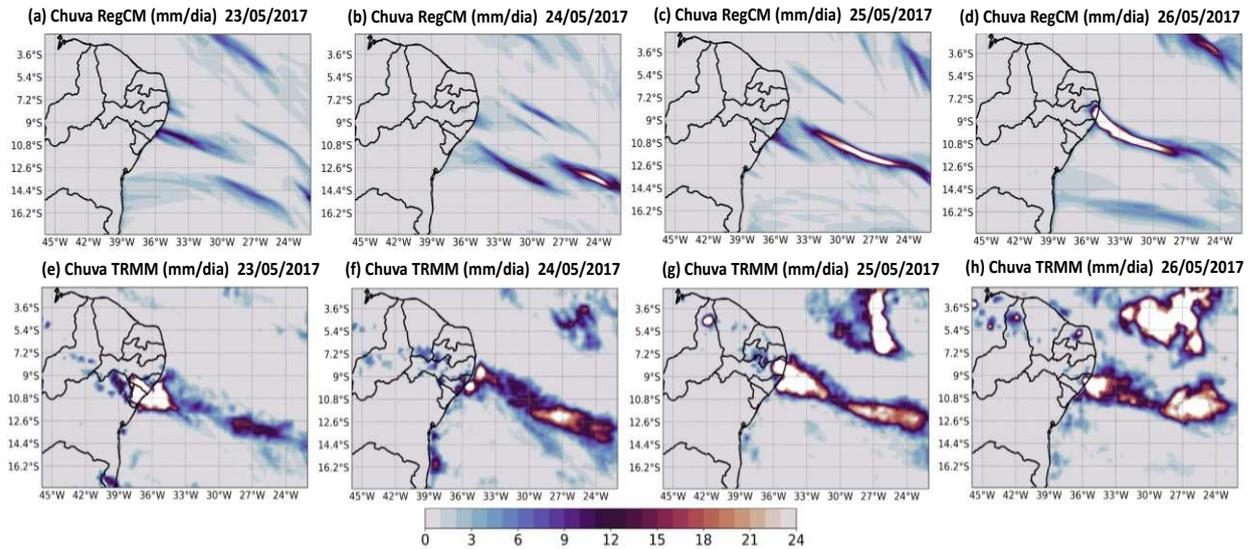


Figura 36. Espacialização da chuva diária na CLNEB durante o período de 23 a 26 de maio de 2017. As imagens da letra a até d correspondem a chuva simulada pelo modelo RegCM. As imagens da letra e até h correspondem à chuva estimada pelo satélite TRMM.

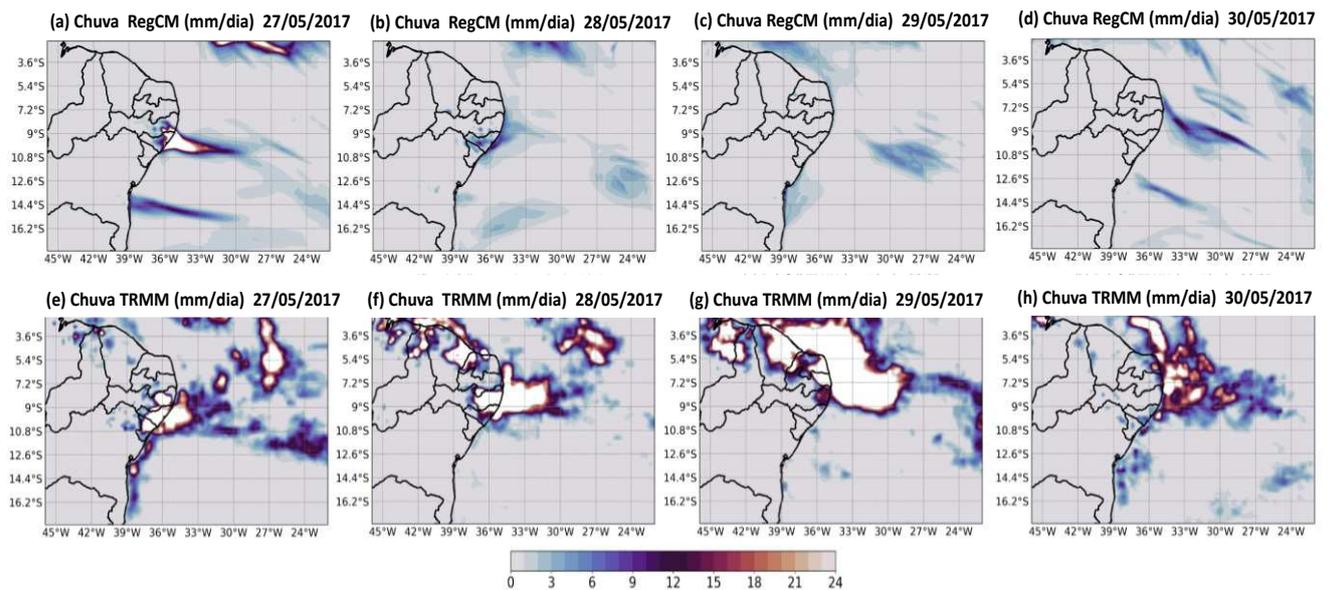


Figura 37. Espacialização da chuva diária na CLNEB durante o período de 27 a 30 de maio de 2017. As imagens da letra a até d correspondem a chuva simulada pelo modelo RegCM. As imagens da letra e até h correspondem à chuva simulada pelo satélite TRMM.

Nota-se que o modelo RegCM conseguiu captar o padrão espacial da chuva sobre o oceano e o continente, principalmente no setor (7° S– 10° S; 33° S– 36° W) onde foram registrados os eventos de deslizamentos desencadeados pela chuva (Figura 36 e Figura 37). No entanto, o sinal de alta pluviosidade que a chuva apresentou no satélite TRMM, foi subestimado pela simulação numérica do RegCM, pois os acumulados diários estiveram abaixo de 8 mm/dia (Figura 36e–h e Figura 37 e–h). Uma exceção a esse padrão de subestimativa foi verificada nos dias 26/05 e 27/05, visto que foram encontrados acumulados acima de 20 mm/dia, concordando com observação via satélite (Figuras 36h e 37e).

A Figura 38 apresenta uma avaliação estatística de BIAS e RMSE da chuva sobre a CLNEB simulada pelo RegCM e observada através do satélite TRMM. É possível notar que durante os oito dias de atuação do sistema precipitante que resultou nos altos acumulados de chuva, o modelo teve a habilidade em simular o padrão de precipitação abaixo do que foi medido. Dessa forma, observa-se que no domínio de 7° S– 10° S; 33° W– 36° W há um núcleo de viés negativo (Figura 38a) associado ao desempenho do modelo durante a simulação, onde também são vistos os maiores desvios com relação à observação através do RMSE (acima de 50mm/dia) (Figura 38b).

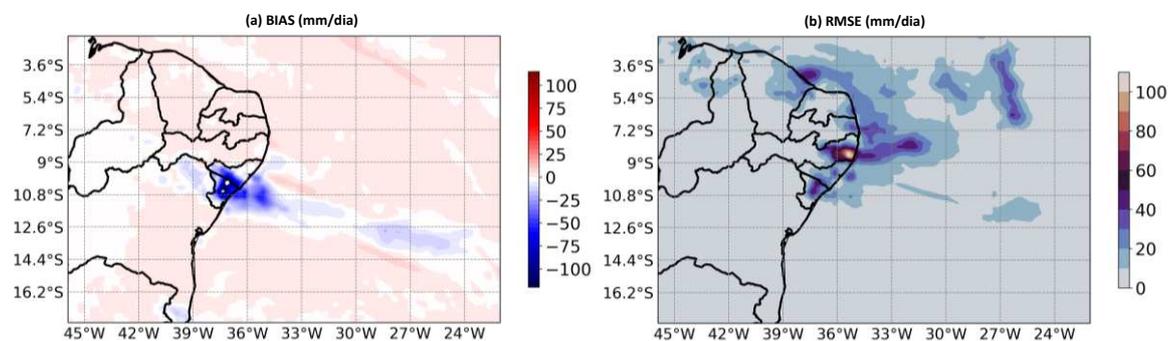


Figura 38. (a) Distribuição do BIAS resultante da análise estatística entre a chuva simulada pelo modelo RegCM e a chuva observada pelo satélite TRMM. (b) Distribuição do RMSE resultante da análise estatística entre a chuva simulada pelo modelo RegCM e a chuva observada pelo satélite TRMM.

A partir do dia 28/05 (Figura 37f), verificou-se que as áreas com pluviosidade diária acima de 20 mm/dia se concentraram sobre a parte norte do NEB (acima de 5° S) e foram mais evidenciadas pelo satélite TRMM. Neste sentido, é visto que o RegCM apresentou deficiência em simular esses máximos volumes, principalmente nos dias 28, 29 e 30/05 (Figura 37 b,c,d). Os estudos que previamente avaliaram o desempenho de simulações no âmbito de clima regional sobre o NEB (MEDEIROS *et al.*, 2020), mostraram que este modelo pode apresentar

imprecisões em simular os aspectos de posicionamento e intensidade da chuva associada a dinâmica de grande escala como na área de atuação da Zona de Convergência Intertropical (SANTOS e SILVA *et al.*, 2014). Dessa forma, é possível que na área ao norte do NEB, a chuva diária seja subestimada durante as simulações, em que isso pode ser associado a possíveis imprecisões em suas opções de parametrização cumulus para a região equatorial.

Em geral, as simulações com modelo RegCM tiveram um desempenho moderado quanto a representação espacial da chuva que ocorreu na CLNEB, considerando as dificuldades em captar a intensidade pluviométrica durante a detecção do sistema precipitante que atuou na região. Como a ocorrência de chuvas extremas contribuiu para o aumento dos deslizamentos (ALHEIROS & FILHO, 2010; COMIN *et al.*, 2021), torna-se necessário a investigação de metodologias e ferramentas que possam prever as condições atmosféricas associadas a esses casos, para que possam ajudar na tomada de decisões voltadas a mitigar esses efeitos. Dessa forma, após a realização de testes paramétricos e de sensibilidade, as simulações com modelo RegCM em escala regional, podem surgir como alternativa para prognosticar com antecedência esses acontecimentos de chuva intensa sobre a CLNEB.

5. CONCLUSÕES

Ao longo dos anos, o município de Jaboatão dos Guararapes localizado na CLNEB, passou por uma intensa transformação em seu espaço urbano, o que contribuiu com o aumento de pessoas habitando áreas impróprias para moradia, e conseqüentemente, criando diversas áreas de riscos geo-hidrológicos na cidade. Diante disso, este estudo mostrou que no período de 2016 a 2020, grande parte dos deslizamentos observados em Jaboatão dos Guararapes se concentraram nos setores norte e leste do município, que foram áreas onde houve um intenso processo antrópico. Essas áreas apresentaram maior predisposição de instabilidade do solo devido as características do meio físico (aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos), juntamente com a elevada suscetibilidade e altitude, principalmente nas Regionais Jaboatão Centro e Cavaleiro.

Os deslizamentos ocorreram com mais frequência no período chuvoso da CLNEB, com destaque para os meses de abril, maio e junho. No período estudado, 2017 foi o ano em que choveu acima do esperado para o período chuvoso de Jaboatão dos Guararapes. Em 2017, o maior número de casos de deslizamentos foi decorrente da chuva no dia da ocorrência, assim como dos dias anteriores, influenciada por diferentes sistemas meteorológicos atuantes na CLNEB.

A relação entre os deslizamentos e a chuva através das curvas ID e ED mostraram que os deslizamentos são influenciados por chuvas tanto de curta como de longa duração, sendo o maior predomínio de casos observados em períodos mais curtos. O limiar de precipitação ED apresentou melhor desempenho em relação ao limiar ID, conforme verificado pelo valor do coeficiente de determinação R^2 . O período de 72 horas anteriores foi o que apresentou a maior variabilidade e dispersão dos acumulados de precipitação, mostrando uma distribuição bastante heterogênea dos intervalos de chuva que ocasionaram os deslizamentos nas Regionais da cidade.

O estudo de caso do evento extremo de chuva na CLNEB que aconteceu em maio de 2017, causou deslizamentos em Jaboatão dos Guararapes assim como em outros municípios de Alagoas, Pernambuco e Paraíba, demonstrando a fragilidade do terreno a este tipo de ameaça natural na CLNEB. As conseqüências desse evento levaram as autoridades e tomadores de decisão a decretar estado de calamidade pública em diversos municípios da CLNEB devido aos desastres que provocaram danos humanos e materiais.

A investigação sobre os aspectos meteorológicos mostrou que este evento estava associado à convergência de umidade sobre o oceano em baixos níveis. Em níveis atmosféricos elevados, observou-se que os maiores núcleos de divergência do vento resultaram da convecção da superfície. Durante os oito dias de ação do sistema convectivo, os elevados índices de chuvas contribuíram com o aumento dos deslizamentos na CLNEB. A precipitação resultante da investigação meteorológica foi representada pelo satélite TRMM na CLNEB, onde os maiores acumulados significativos foram encontrados na área próxima ao litoral. Em relação à chuva simulada pelo RegCM, observou-se que o modelo regional teve um desempenho moderado na CLNEB, por apresentar uma subestimativa na simulação da intensidade da chuva.

Diante desses resultados, verificou-se a necessidade de monitoramento contínuo das condições atmosféricas na CLNEB, devido à importância da obtenção de previsões de qualidade sobre a precipitação na região. Assim, a simulação com modelagem numérica regional através do RegCM poderá ser uma alternativa para prever as condições atmosféricas futuras que poderão levar a maiores impactos relacionados com as chuvas. Portanto, sugere-se que novos testes paramétricos sejam realizados para melhorar a qualidade da representação atmosférica da CLNEB. Da mesma forma, explorar a relação entre os processos de precipitação e deslizamento nesta região poderá fornecer critérios objetivos de avaliação de risco.

Por fim, analisar a relação existente entre deslizamento e precipitação, via estudos empíricos ajudam a determinar parâmetros pluviométricos críticos que podem servir como ferramentas na gestão de risco, potencializando as ações de prevenção e mitigação de desastres. Além disso, a integração de dados de reanálise, banco de dados de satélite e radar meteorológico e modelos numéricos regionais poderão auxiliar na melhoria da qualidade dos dados preditivos para o gerenciamento eficaz de sistemas de monitoramento e alerta de deslizamentos.

REFERÊNCIAS

- ALERTABLU. **Índices de monitoramento – critérios pluviométricos para determinação de probabilidade de escorregamentos.** Blumenau. <<http://alertablu.cob.sc.gov.br/c/escorregamentos/>> Acessado em: 10 de março de 2021.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais...** Belém, 1988. p. 753-760.
- ALHEIROS, M. M.; FILHO, O. A. Landslides and coastal erosion hazards in Brazil. **International Geology Review** v. 39, n. 8, p. 756-763, 2010.
- ALTHUWAYNEE, O. F.; ASIKOGLU, O.; ERIS, E. Threshold contour production of rainfall intensity that induces landslides in susceptible regions of northern Turkey. **Landslides** v. 15, p. 1541-1560, 2018.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6 p. 711-728, 2014.
- ALVES, J. M. B.; da SILVA, E. M.; SOMBRA, S. S.; BARBOSA, A. C. B.; dos SANTOS, A. C. S.; LIRA, M. A. T. Eventos extremos diários de chuva no Nordeste do Brasil e características atmosféricas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2 p. 227-233, 2017.
- AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; da ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of The New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 98-120, 2019.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológica-geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFRERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTA, 1, 1992, Rio de Janeiro. **ABMS-ABGE-ISSMGE**, v. 2, 1992. p. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP.** 1994. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, 1994.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C.; DILÁSCIO, M. V. Estabilização de taludes. In: _____. **Geologia de Engenharia e Ambiental**. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2017. p. 399-421.

ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 11, p. 1-13, 2016.

BANDEIRA, A. P. N.; COUTINHO, R. Q. Critical rainfall parameters: proposed landslide warning system for the metropolitan region of Recife, PE, Brazil. **Soils & Rocks**, v. 38, p. 27-48, 2015.

BARBOSA, R. G. **Variabilidade da ocorrência de deslizamentos de terra e sua relação com a precipitação na cidade de Manaus**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade do Estado do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, 2017.

CALVELLO, M.; D'ORSI, R. N.; PICIULLO, L.; PAES, N.; MAGALHAES, M.; LACERDA, W. A. The Rio de Janeiro Early Warning System for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010-2013. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 12, p. 3-15, 2015.

CARMO, R. L.; ANAZAWA, T. M. Mortalidade por desastres no Brasil: o que mostram os dados. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 19, p. 3669-3681, 2014.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes frias sobre o Brasil. In: _____. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. p. 135-146.

CEPED. **Atlas Brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012: Volume Brasil**. Florianópolis, SC: CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, 2013. 126 p.

CEPED. **Atlas Brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012: Volume Pernambuco**. Florianópolis, SC: CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, 2013. 131 p.

CEMADEN. **Boletim Trimestral 2º Trimestre/2020**. São José dos Campos, 2020. <<http://cemaden.gov.br/boletim-trimestral/>> Acessado em: 15 de fevereiro de 2021.

CENAD. **Anuário brasileiro de desastres naturais**. Brasília: CENAD – Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres, 2013. 84 p.

CLIMANÁLISE. **Boletim Climanálise Dez/2010 e Jan/2011**. Cachoeira Paulista, 2011. <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>> Acessado em: 30 de janeiro de 2021.

COMIN, A. N.; JUSTINO, F.; PEZZI, L. Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 133, n. 2, p. 141-162, 2021.

CORREIA FILHO, W. L. F.; de OLIVEIRA-JUNIOR, J. F.; SANTIAGO, D. B.; TERASSI, P. M. B.; TEODORO, P. E.; de GOIS, G.; BLANCO, C. J. C.; SOUZA, P. H. A.; COSTA, M. S.; GOMES, H. B.; dos SANTOS, P. J. Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSEA product. **Big Earth Data**, v. 3, n. 4, p. 315-337, 2019.

COUTINHO, R. Q.; LUCENA, R.; HENRIQUE, H. M. Disaster risk governance: institutional vulnerability assessment with emphasis on non-structural measures in the municipality of Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco (PE), Brazil. **Disaster Prevention and Management: An International Journal**, p. 1-33, 2020.

CPRM. **Jaboatão dos Guararapes: mapa de indicadores geotécnicos**. Recife, PE: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1996. 29 p.

CPRM. **Atlas do meio físico do município de Jaboatão dos Guararapes – Estado de Pernambuco**. Recife, PE: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1997. 42 p.

CPRM. **Sistema de informações geambientais da região metropolitana do Recife**. Recife, PE: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2003. 137 p.

CPRM. **Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa**. Rio de Janeiro, RJ: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2018. 214 p.

CPRM. **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações – Jaboatão dos Guararapes - Pernambuco**. Recife, PE: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2019. 54 p.

CPTEC. **Evento de chuva intensa em parte do Nordeste do país: caso ocorrido no leste do Nordeste em maio de 2017**. Cachoeira Paulista, SP: Boletim Técnico CPTEC – Centro de

Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, 2017. 6 p. <<http://cptec.inpe.br/noticias/quadro/48/>>
Acessado em: 15 de dezembro de 2020.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: _____. **Landslides: investigation and mitigation**. Washington, USA: National Academy Press, 1996. p. 337-370.

DAMASCENO, A. D. O.; CARDOSO, A. Discussão sobre limiares críticos de precipitação na gestão de riscos a movimentos de massa no Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 16, 2018, Ponta Delgada. **Anais...** Ponta Delgada, 2018. p. 1-13.

DE AZEVEDO, S. C.; CARDIM, G. P.; PUGA, F.; SINGH, R. P.; da SILVA, E. A. Analysis of the 2012-2016 drought in the Northeast Brazil and its impacts on the Sobradinho water reservoir. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 5 p. 438-446, 2018.

DEFESA CIVIL. **Avaliação das ações de prevenção de deslizamentos de encostas**. Recife, PE: Prefeitura de Jaboatão dos Guararapes, 2011. 55 p.

DE OLIVEIRA SANTOS, B. B.; NUNES, L. H.; BANDINI, M. P. Rainfall episodes and local stability thresholds in Santos. In: _____. **Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options**. E-book, 2019. p. 161-175.

D'ORSI, R. N.; PAES, N. M.; MAGALHÃES, M. A.; COELHO, R. da S.; COSTA, L. da C. **Relatório de correlação entre chuvas e escorregamentos para a cidade do Rio de Janeiro no ano de 2010**. Rio de Janeiro, RJ: GEO-RIO – Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, 2012. 58 p.

DMR-RJ. **Plano de contingência do DMR-RJ – período dez/2017-abril/2018**. Rio de Janeiro, RJ: DMR – Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro, 2017. 9 p.

DOS REIS, J. S.; GONÇALVES, W. A.; MENDES, D. Climatology of the dynamic and thermodynamic features of Upper Tropospheric Cyclonic Vortices in northeast Brazil. **Climate Dynamics** v. 1, p. 1-19, 2021.

EMANUEL, K. A. A scheme for representing cumulus convection in large-scales models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 21, p. 2313-2329, 1991.

FEDOROVA, N. Sistemas e processos sinóticos atuantes na América do Sul. In: _____. **Sinótica IV**. Alagoas, AL: EDUFAL, 2008. 192 p.

- FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CRUZ, C. D. On frontal zone analysis in the tropical region of the northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 173, p. 1403-1421, 2016.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z.; et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, v. 102, p. 85-98, 2008.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico geomorfológica. In: _____. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand, 2010. p. 123-194.
- FERREIRA, R. R.; SOUZA, E. P. Aspectos termodinâmicos de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre a região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 3 p. 504-513, 2019.
- FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 576 p.
- GALINDO, V. M. H. **Uso e ocupação do solo sob o enfoque da gestão ambiental: a orla marítima no município do Jaboatão dos Guararapes - PE**. 2002. 235 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais) – Universidade Federal de Pernambuco, 2002.
- GARIANO, S. L.; BRUNETTI, M. T.; LOVINE, G.; MELILLO, M.; PERUCCACCI, S.; TERRANOVA, O.; VENNARI, C.; GUZZETTI, F. Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. **Geomorphology**, v. 228, p. 653-665, 2015.
- GARIANO, S. L.; BRUNETTI, M. T.; MELILLO, M.; PERUCCACCI, S. How much does the rainfall temporal resolution affect rainfall thresholds for landslide triggering?. **Natural Hazards**, v. 100, p. 655-670, 2020.
- GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Surface wind speed: trend and climatology of Brazil from 1980-2014. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 1060-1072, 2017.
- GOMES, H. B.; AMBRIZZI, T.; da SILVA, B. F. P.; HODGES, K.; HERDIES, D. L. Easterly waves disturbances over Northeast Brazil: an observational analysis. **Advances in Meteorology**, v. 10, p. 1-20, 2015.

GOMES, H. B.; AMBRIZZI, T.; da SILVA, B. F. P.; HODGES, K.; DIAS, P. L. S.; HERDIES, D. L.; SILVA, M. C. L.; GOMES, H. B. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 1393-1411, 2019.

GRAMANI, M. F. A. A corrida de massa no córrego Guarda Mão, município de Itaoca (SP): impacto e observações de campo. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15, 2015, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves, 2015. p. 1-10.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, p. 1589-1609, 2009.

GUIDICINE, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2º edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. 194 p.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 98, n. 2, p. 239-267, 2007.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. **Landslides**, v. 5, n. 1, p. 3-17, 2008.

HADER, P. R. P. **Metodologia para avaliação de perigo de movimentos de massa considerando fatores socionaturais**. 2021. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, 2021.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorologic Society**. v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – a guide to understanding landslides**. Reston, USA: USGS – U.S. Geological Survey, 2008. 129 p.

HOLTSLAG, A. A. M.; de BRUJIN, E. I. F.; PAN, H. L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. **Monthly Weather Review**, v. 118, n. 8, p. 1561-1575, 1990.

HOUNSOU-GBO, G. A.; ARAUJO, M.; BOURLES, B.; VELEDA, D.; SERVAIN, J. Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the Northeast Brazilian coast. **Advances in Meteorology**, p. 1-13, 2015.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. 95 p.

IBGE. **Macrocaracterização dos recursos naturais do Brasil: Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil primeira aproximação**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. 60 p.

IBGE. **Cidades e Estados**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <<http://ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/jaboatao-dos-guararapes.html>> Acessado em: 05 de janeiro de 2021.

IDE, F. S. **Escorregamento, meteorologia e precipitação: uma proposta de método de investigação para a prevenção e monitoramento de riscos, aplicado em Campinas/SP**. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2005.

IDE, F. S.; MACEDO, E. S. Investigação da relação chuva e escorregamento no município de Campinas (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 16, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 1058-1066.

IG-SP. **Relatório da operação dos planos preventivos de Defesa Civil – PPDC – Operação verão 2016-2017**. SP: IG – Instituto Geológico do Estado de São Paulo, 2017. 23 p.

IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rio**. São Paulo, SP: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2007. 176 p.

IPT. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000**. São Paulo, SP: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2014. 50 p.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. E.; SOUZA, R. A. F. de. Relations between ENSO and the South Atlantic SST modes and their effects on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 8, p. 2008-2023, 2013.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

KUMAR, D.; RAI, P.; DIMRI, A. P. Investigating Indian summer monsoon in coupled regional land-atmosphere downscaling experiments using RegCM4. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 2959-2980, 2020.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A.S.; ADLER, R.; OLSON, W.S. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.

LEE, S.; WON, R. J. S.; JEON, S. W. F.; PARK, I.; LEE, M. J. Spatial landslide hazard prediction using rainfall probability and a logistic regression model. **Mathematical Geosciences**, v. 47, n. 5, p. 565-589, 2015.

LEE, W. Y.; PARK, S. K.; SUNG, H. H. The optimal rainfall thresholds and probabilistic rainfall conditions for a landslide Early Warning System for Chuncheon, Republic of Korea. **Landslides**, v. 18, p. 1721-1739, 2021.

LOPART, M.; da ROCHA, R. P.; REBOITA, M.; CUADRA, S. Sensitivity of simulated South America climate to the land surface schemes in RegCM4. **Climate Dynamics**, v. 49, p. 3975-3987, 2017.

LUCAS, T. P. B.; PLEC, D.; ABREU, M. L.; PARIZZI, M. G. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, p. 7-21, 2013.

LYRA, M. J. A.; FEDOROVA, N.; LEVIT, S. W.; de FREITAS, I. G. F. Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. especial, p. 727-734, 2020.

MACHADO, L. A. T.; FERREIRA, N. J.; LAURENT, H.; DIEDHIU, A. Distúrbios ondulatórios de leste. In: _____. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. p. 61-74.

MARBAIX, P.; GALLÉE, H.; BRASSEUR, O.; van YPERSELE, J. Lateral boundary conditions in regional climate models: a detailed study of the relaxation procedure. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 3, p. 461-479, 2003.

MARCHEZINI, V.; LONDE, L. R.; BERNARDES, T.; CONCEIÇÃO, R. S.; dos SANTOS, E. V.; SAITO, S. M.; SOLER, L.; da SILVA, A. E. P.; BORBOLETTI, K. C.; MEDEIROS,

M. D. S.; GONÇALVES, D. A. Sistema de alerta de risco de desastres no Brasil: desafios à redução da vulnerabilidade institucional. In: _____. **Redução de Vulnerabilidade e Desastres: do conhecimento a ação**. E-book, 2017. p. 288-310.

MARCHEZINI, V.; MOURÃO, C.; SCOFIELD, G.; METODIEV, D.; FLORES, S. S. L. Sistemas comunitários de alerta de riscos de desastres associados a inundações e deslizamentos: aspectos teóricos e metodológicos. **Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres**, v. 4, n. 2, p. 36-56, 2020.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. In: _____. **Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2018. p. 5-11.

MARQUES, G. B.; SILVA, T. S.; MOURA, M. O. Ocorrências de desastres naturais nos principais arranjos populacionais da Sub-região Leste do Nordeste brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 31-44, 2018.

MEDEIROS, F. J.; de OLIVEIRA, C. P.; SANTOS e SILVA, C. M.; MEDEIROS, J. Numerical simulation of the circulation and tropical teleconnection mechanisms of a severe drought event (2012-2016) in Northeast Brazil. **Climate Dynamics**, v. 59, p. 4043-4057, 2020.

MELO, A. B. C. de.; CAVALCANTI, I. F. de A.; SOUZA, P. P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. In: _____. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. p. 25-41.

MENDES, R. M.; FILHO, M. V.; BERTOLDO, M. A.; SILVA, M. F. da. Estudo de limiares críticos de chuva deflagradores de deslizamentos no município de São José dos Campos/ SP-Brasil. **Territorium**, v. 22, p. 119-129, 2015.

METODIEV, D.; de ANDRADE, M. R. M.; MENDES, R. M.; de MORAES, M. A. E.; KONIG, T.; BORTOLOZO, C. A.; BERNARDES, T.; LUIZ, R. A. F.; COELHO, J. O. M. Correlation between rainfall and mass movements in north coast region of São Paulo state, Brazil for 2014-2018. **International Journal of Geosciences**, v. 9, p. 669-679, 2018.

MIRANDA, L. I. B. Organização socioespacial e mobilidade residencial na Região Metropolitana do Recife, PE. **Cadernos Metrôpole**, n. 12, p. 123-144, 2004.

- MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 102, n. 14, p. 16663-16682, 1997.
- MORAIS, M. D. C.; OLIVEIRA, F. P.; COUTINHO, M. D. L. One case of simulation of Upper Tropospheric Cyclonic Vortex in the Brazil Northeast – impact in the convection parameterization. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 5, n. 1, p. 27-44, 2015.
- MOURA, J. R. S.; SILVA, T. M. Complexos de rampas de colúvio. In: _____. **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 1998. p. 143-180.
- MOURA, M. O.; CUNICO, C.; NÓBREGA, R. S.; DUARTE, C. C. Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de estado de calamidade pública. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 259-271, 2016.
- NAIDU, S.; SAJINKUMAR, K. S.; OOMMEN, T.; ANUJA, V. J.; SAMUEL, R. A.; MURALEEDHARAN, C. Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis. **Geoscience Frontiers**, v. 9, n. 6, p. 1871-1882, 2018.
- NEVES, D. J. D.; ALCÂNTARA, C. R.; SOUZA, E. P de. Estudo de caso de um Distúrbio Ondulatório de Leste sobre o estado do Rio Grande do Norte – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 31, n. 4, p. 490-505, 2016.
- NICHOLSON, S. E. The ITZC the seasonal cycle over Equatorial Africa. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 2, p. 337-348, 2018.
- OLESON, K.; BONAN, G. B.; LEVIS, S.; et al. **Technical description of the community Land Model (CLM)**. NCAR Tech Note, 2004. 186 p.
- OLIVEIRA, F. P.; OYAMA, M. D. Squall Line initiation over the Northern Coast of Brazil in march: observational features. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, p. 1-14, 2019.
- PAL, J. S.; SMALL, E. E.; ELTAHIR, E. A. B. Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation process within RegCM. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 105, n. 24, p. 29579-29594, 2000.

PALHARINI, R. S. A.; VILA, D. A. Climatological behavior of precipitating clouds in the Northeast region of Brazil. **Advances in Meteorology**, p. 1-12, 2017.

PBMC. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas.** Rio de Janeiro, RJ: COPPE-UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 464 p.

PBMC. **Mudanças climáticas e cidades: relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas.** Rio de Janeiro, RJ: COPPE-UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, 2016. 116 p.

PERUCCACCI, S.; BRUNETTI, M. T.; LUCIANI, S.; VENNARI, C.; GUZETTI, F. Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. **Geomorphology**, v. 139, p. 79-90, 2012.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos da região metropolitana de Recife.** 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2007.

POLZIN, D.; HASTENRATH, S. Climate of Brazil's Nordeste and tropical Atlantic sector: preferred time scales variability. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 2, p. 153-160, 2014.

RAO, V. B.; LIMA, M. C de.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, n. 9, p. 1754-1763, 1993.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, B. A.; PINHEIRO, R. F.; ROCHA, R. P. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, n. 8, p. 1-15, 2019.

REPINALDO, H. F. B.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V; REPINALDO, C. R. R. Upper Tropospheric Cyclonic Vortex and Brazilian Northeast Jet Stream over Alagoas state: circulation patterns and rainfall. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. especial, p. 745-754, 2020.

RIBEIRO, R. S. **Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos.** 2013. 218 f. Tese (Doutorado em

Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2013.

RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; SANTOS E SILVA, C. M. Spatial and temporal assessment of the extreme and daily precipitation of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite in Northeast Brazil. **Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 549-572, 2019.

SANTORO, J.; MENDES, R. M.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MANOEL, G. dos R. Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do plano preventivo de defesa civil em São Paulo, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 7, 2010, Belém. **Anais...** Bélem, 2010. p. 1-15.

SANTOS e SILVA, C. M.; SILVA, A.; OLIVEIRA, P.; LIMA, K. C. Dynamical downscaling of the precipitation Northeast Brazil with a regional climate model during contrasting years. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, n. 1, p. 50-57, 2014.

SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; da SILVA, R. M.; SANTOS, D. C. Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 33, p. 545-562, 2019.

SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; da SILVA, R. M.; COSTA, S. G. F. Cluster analysis applied to spatiotemporal variability of monthly precipitation over Paraíba state using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, 637, 2019.

SEGONI, S.; ROSI, A.; ROSSI, G.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaico f triggering thresholds for regional-scale warning systems. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 9, p. 2637-2648, 2014.

SEGONI, S.; PICIULLO, L.; GARIANO, S. L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. **Landslides**, v. 15, n. 8, p. 1483-1501, 2018.

SELBY, M. J. **Hillslope material and process**. 2º edição. New York: Oxford University Press, 1993. 466 p.

SEPULVEDA, S. A.; PETLEY, D. N. Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. **Natural Hazards Earth System**, v. 15, p. 1821-1833, 2015.

SILVA, L. G. **Tipologia das dinâmicas de urbanização na franja rural-urbana em Jaboatão dos Guararapes – Região metropolitana do Recife**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2010.

SOUZA, W.; AZEVEDO, P.; ARAÚJO, L. Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade de Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 250-268, 2012.

STRANG, D. M. G. D. **Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste brasileiro**. São José dos Campos, SP: CTA – Centro Técnico Aeroespacial, 1972. 70 p.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos aplicados as encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, 187, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1987. p. 225-236.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Comparação do uso de Modelos Digitais de Elevação em mapeamento digital de solos em Dois Irmãos, RS, Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 38, p. 1367-1376, 2014.

TIEDTKE, M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 8, p. 1779-1800, 1989.

TIEDTKE, M. Representation of clouds in large-scale models. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 11, p. 3040-3061, 1993.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 2007. 220 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, 2007.

TOMINAGA, L. K. Escorregamentos. In: _____. **Desastre naturais: conhecer para prevenir**. 3º edição. São Paulo, SP: Instituto Geológico, 2015. p. 25-38.

- UNISDR. **Terminology on disaster risk reduction**. Geneva, Switzerland: UNISDR – United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009. 30 p.
- UTIDA, G.; CRUZ, F. ETOURNEAU, J.; et al. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITZC displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1-8, 2019.
- VALADÃO, C. E. A.; CARVALHO, L. M. V.; LUCIO, P. S.; CHAVES, R. R. Impacts of the Madden-Julian Oscillation on intraseasonal precipitation over Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1859-1884, 2017.
- VARNES, D. J. Slope movement types and process. In: _____. **Landslides: analysis and control**. Washington, USA: National Research Council, 1978. p. 11-33.
- VASCONCELOS JUNIOR, F. das C.; JONES, C. GANDU, A. W. Interannual and intraseasonal variations of the onset and demise of the pre-wet season and the wet season in the Northern Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 33, n. 3, p. 472-484, 2018.
- VENANCIO, A. S.; PANCHER, A. M.; CUNHA, C. M. L.; MACHADO, F. B.; SOARES JUNIOR, A. V. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Várzea Paulista (SP) utilizando os Sistemas de Informação Geográfica. **Geociências**, v. 32, n. 1, p. 81-92, 2013.
- YAMAZAKI, Y.; RAO, V.B. Tropical cloudiness over the South Atlantic ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 55, p. 205-207, 1977.
- YILMAZ, I.; YILDIRIM, M.; KESKIN, I. A. A method for mapping the spatial distribution of rockfall computer program analyses results using ArcGIS software. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 67, n. 4, p. 547-554, 2008.
- ZENG, X.; ZHAO, M.; DICKINSON, R. E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. **Journal of Climate**, v. 11, n. 10, p. 2628-2644, 1998.

ANEXOS

ANEXO A – Quadro 7. Deslizamentos registrados no município de Jaboatão dos Guararapes no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2020.

Fonte: CEMADEN.

Data Ocorrência	Horário da Ocorrência	Latitude	Longitude	Regional	Bairro	Desabrigados	Desalojados	Óbitos
17/04/2016	Manhã 06:01 as 12:00	-8,168813	-34,920874	(5) Prazeres	Cajueiro Seco			
09/05/2016	Sem informação	-8,086664	-34,975670	(2) Cavaleiro	Cavaleiro			
30/05/2016	Tarde 12:01 as 18:00	-8,168813	-34,920874	(5) Prazeres	Cajueiro Seco			
13/04/2017	Hora aproximada 09:50	-8,130475	-35,034983	(1) Jaboatão Centro	Vila Rica			
29/05/2017	Hora exata 00:00	-8,124562	-35,020792	(1) Jaboatão Centro	Vila Rica			
29/05/2017	Hora exata 12:40	-8,169759	-34,923751	(5) Prazeres	Cajueiro Seco			
29/05/2017	Hora exata 14:40	-8,177062	-34,937221	(5) Prazeres	Cajueiro Seco			
29/05/2017	Hora exata 12:40	-8,104127	-35,021312	(1) Jaboatão Centro	Santo Aleixo			
29/05/2017	Hora exata 14:20	-8,141791	-34,935219	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
15/06/2017	Hora exata 18:15	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara			
15/06/2017	Hora exata 18:15	-8,104440	-34,991175	(1) Jaboatão Centro	Santana			
15/06/2017	Hora exata 11:35	-8,079835	-35,000690	(3) Curado	Curado II			
15/06/2017	Hora exata 14:00	-8,123990	-34,960795	(2) Cavaleiro	Zumbi do Pacheco			
15/06/2017	Hora exata 12:40	-8,105325	-34,988120	(1) Jaboatão Centro	Socorro			
15/06/2017	Hora exata 11:35	-8,126890	-35,031380	(1) Jaboatão Centro	Vila Rica			

15/06/2017	Hora exata 12:02	-8,069090	-35,001050	(3) Curado	Curado IV			
15/06/2017	Sem informação	-8,108280	-34,983610	(1) Jaboatão Centro	Socorro			
24/06/2017	Hora exata 11:30	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara			
29/06/2017	Hora exata 10:50	-8,157545	-34,932254	(7) Guararapes	Muribeca dos Guararapes			
29/06/2017	Hora exata 11:15	-8,146322	-34,938699	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
29/06/2017	Hora exata 11:56	-8,138629	-34,962027	(2) Cavaleiro	UR-06			
29/06/2017	Hora exata 12:50	-8,097857	-34,968935	(2) Cavaleiro	Pacheco			
29/06/2017	Hora exata 10:15	-8,102987	-34,978686	(2) Cavaleiro	Sucupira			
29/06/2017	Hora exata 10:31	-8,084322	-34,974621	(2) Cavaleiro	Alto da Colina			
29/06/2017	Tarde 12:01 as 18:00	-8,147075	-34,935343	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
29/06/2017	Tarde 12:01 as 18:00	-8,149285	-34,931985	(7) Guararapes	Muribeca dos Guararapes			
29/06/2017	Hora exata 11:32	-8,134015	-34,965505	(2) Cavaleiro	Zumbi do Pacheco			
29/06/2017	Hora exata 08:35	-8,111974	-34,974333	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros			
29/06/2017	Tarde 12:01 as 18:00	-8,156002	-34,925309	(7) Guararapes	Muribeca dos Guararapes			
29/06/2017	Tarde 12:01 as 18:00	-8,179550	-34,947030	(5) Prazeres	Jardim Prazeres			
29/06/2017	Tarde 12:01 as 18:00	-8,144955	-34,927945	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
30/06/2017	Hora exata 07:20	-8,155549	-34,924808	(7) Guararapes	Muribeca dos Guararapes			
30/06/2017	Hora exata 07:20	-8,154210	-34,926971	(7) Guararapes	Muribeca dos Guararapes			
01/07/2017	Hora exata 20:50	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara			
22/07/2017	Sem informação	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara			

19/01/2018	Hora aproximada 08:15	-8,100437	-34,967310	(2) Cavaleiro	Sucupira			
19/01/2018	Hora aproximada 13:00	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara			
19/01/2018	Hora aproximada 14:00	-8,132693	-34,960827	(2) Cavaleiro	Zumbi do Pacheco			
19/01/2018	Hora aproximada 13:25	-8,084786	-34,989673	(1) Jaboatão Centro	Floriano			
06/03/2018	Sem informação	-8,168813	-34,920874	(5) Prazeres	Cajueiro seco		4	
06/04/2018	Hora aproximada 12:40	-8,069927	-34,997863	(3) Curado	Curado IV			
23/04/2018	Madrugada 00:00 as 06:00	-8,091553	-34,975465	(2) Cavaleiro	Cavaleiro		28	
28/01/2019	Manhã 06:01 as 12:00	-8,087894	-34,975979	(2) Cavaleiro	Cavaleiro			
06/02/2019	Hora aproximada 07:40	-8,124916	-35,031569	(1) Jaboatão Centro	Vila Rica			
06/02/2019	Hora aproximada 08:00	-8,099768	-34,985198	(2) Cavaleiro	Sucupira			
06/02/2019	Hora aproximada 10:04	-8,072528	-35,001053	(3) Curado	Curado IV			
01/04/2019	Sem informação	-8,091553	-34,975465	(2) Cavaleiro	Cavaleiro			
12/04/2019	Hora aproximada 18:11	-8,088411	-35,026824	(1) Jaboatão Centro	Manassu			
12/04/2019	Hora aproximada 09:45	-8,106603	-35,002662	(1) Jaboatão Centro	Engenho Velho			
29/05/2019	Hora exata 14:45	-8,105706	-35,005082	(1) Jaboatão Centro	Engenho Velho			
29/05/2019	Hora exata 12:35	-8,073257	-34,993821	(3) Curado	Curado IV			
29/05/2019	Hora exata 09:49	-8,121481	-34,963543	(2) Cavaleiro	Zumbi do Pacheco			
29/05/2019	Hora exata 09:38	-8,130337	-34,968576	(2) Cavaleiro	Zumbi do Pacheco			
13/06/2019	Hora aproximada 20:34	-8,121861	-35,025426	(1) Jaboatão Centro	Vila Rica			1

13/06/2019	Hora aproximada 22:42	-8,107247	-35,002384	(1) Jaboatão Centro	Engenho Velho			
13/06/2019	Hora aproximada 17:47	-8,104744	-34,991238	(1) Jaboatão Centro	Socorro			
13/06/2019	Hora aproximada 16:35	-8,103885	-34,992289	(1) Jaboatão Centro	Socorro			
13/06/2019	Manhã 06:01 as 12:00	-8,111819	-34,961014	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros			
13/06/2019	Hora aproximada 20:34	-8,107702	-35,015245	(1) Jaboatão Centro	Cascata			
13/06/2019	Hora aproximada 19:05	-8,130747	-35,035351	(1) Jaboatão Centro	Centro			
13/06/2019	Hora aproximada 21:30	-8,108703	-35,015531	(1) Jaboatão Centro	Cascata			
13/06/2019	Hora aproximada 21:20	-8,096486	-35,019541	(1) Jaboatão Centro	Santo Aleixo			
13/06/2019	Hora aproximada 16:15	-8,119904	-34,965968	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros			
13/06/2019	Hora aproximada 15:34	-8,115228	-34,967817	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros			
13/06/2019	Hora aproximada 16:34	-8,097535	-34,972638	(2) Cavaleiro	Cavaleiro			
13/06/2019	Hora aproximada 16:23	-8,119266	-34,960412	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros			
17/06/2019	Hora aproximada 07:52	-8,131417	-34,963600	(2) Cavaleiro	Zumbi do Pacheco			
17/06/2019	Hora aproximada 08:20	-8,082787	-34,975767	(2) Cavaleiro	Cavaleiro			
24/07/2019	Manhã - 06:01 as 12:00	-8,115131	-34,959799	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros	24	16	
15/03/2020	Hora aproximada 09:20	-8,097568	-35,020866	(1) Jaboatão Centro	Santo Aleixo			
19/04/2020	Hora exata 15:00	-8,080630	-34,974368	(2) Cavaleiro	Alto da Colina			
21/04/2020	Hora exata 09:55	-8,086179	-34,984288	(3) Curado	Curado I			

24/04/2020	Hora aproximada 17:23	-8,148895	-34,937994	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
24/04/2020	Hora aproximada 17:45	-8,147678	-34,940833	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
24/04/2020	Hora aproximada 13:04	-8,067143	-34,995556	(3) Curado	Curado IV			
26/04/2020	Hora aproximada 10:30	-8,099251	-34,992555	(1) Jaboatão Centro	Floriano			
23/05/2020	Hora exata 11:17	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara	4		
23/05/2020	Hora aproximada 12:30	-8,107643	-35,012675	(1) Jaboatão Centro	Cascata			
23/05/2020	Hora aproximada 12:30	-8,108576	-34,963699	(2) Cavaleiro	Dois Carneiros			
07/06/2020	Manhã 06:01 as 12:00	-8,148992	-34,935547	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
14/06/2020	Hora aproximada 00:00	-8,141579	-34,938082	(7) Guararapes	Jardim Jordão			
15/06/2020	Manhã 06:01 as 12:00	-8,168813	-34,920874	(5) Prazeres	Cajueiro Seco			
15/06/2020	Manhã 06:01 as 12:00	-8,171952	-34,935615	(5) Prazeres	Cajueiro Seco			
15/06/2020	Manhã 06:01 as 12:00	-8,206948	-34,920876	(6) Praias	Candeias			
15/06/2020	Hora aproximada 10:55	-8,138254	-34,974554	(4) Muribeca	Marcos Freire			
15/06/2020	Manhã 06:01 as 12:00	-8,135247	-34,960282	(2) Cavaleiro	UR-06			
05/07/2020	Hora aproximada 17:00	-8,152158	-35,003361	(1) Jaboatão Centro	Muribeca dos Guarara			
18/07/2020	Hora aproximada 08:53	-8,100940	-34,995189	(1) Jaboatão Centro	Floriano		4	

ANEXO B – Quadro 8. Condições atmosféricas e sistemas meteorológicos responsáveis por causar as ocorrências de deslizamentos no município de Jaboatão dos Guararapes no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2020.

Data de ocorrência	Causa	Fonte
17/04/2016	Cavado invertido e difluência em altos níveis	Boletim técnico CPTEC
09/05/2016	DOL em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
30/05/2016	Convergência de umidade pelo escoamento de leste/sudeste em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
13/04/2017	Convergência de umidade pelo escoamento de leste em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
29/05/2017	Convergência de umidade do escoamento proveniente do oceano em baixos níveis e divergência em altos níveis	Boletim técnico CPTEC; APAC
15/06/2017	Convergência de umidade proveniente do oceano em baixos níveis e cavado invertido sobre oceano	Boletim técnico CPTEC
24/06/2017	Transporte de umidade em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
29/06/2017	Cavado em altos níveis e transporte de umidade do oceano em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
30/06/2017	Cavado em altos níveis e transporte de umidade do oceano em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
01/07/2017	Cavado em altos níveis e transporte de umidade do oceano em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
22/07/2017	Transporte de umidade em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
19/01/2018	DOL em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
06/03/2018	Convergência de umidade em baixos níveis e divergência em altos níveis	Boletim técnico CPTEC
06/04/2018	VCAN em altos níveis	Boletim técnico CPTEC
23/04/2018	Convergência de umidade em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
28/01/2019	Difluência em altos níveis, VCAN e termodinâmica	Boletim técnico CPTEC
06/02/2019	Cavado em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
01/04/2019	Difluência, cavado e divergência de massa em altos níveis e convergência em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC

12/04/2019	Difluência, cavado e divergência de massa em altos níveis e convergência em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC
13/06/2019	Ventos de leste/sudeste em baixos níveis, POAs	Boletim técnico CPTEC; APAC
17/06/2019	Ventos de leste/sudeste em baixos níveis, DOL	Boletim técnico CPTEC; APAC
24/07/2019	Ventos de leste/sudeste em baixos níveis, POAs	Boletim técnico CPTEC; APAC
15/03/2020	ZCIT, convecção, termodinâmica	Boletim técnico CPTEC; APAC
19/04/2020	DOL	Boletim técnico CPTEC; APAC
21/04/2020	Cavado no escoamento de leste, divergência em altos níveis, confluência em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC; APAC
24/04/2020	Cavado no escoamento de leste, divergência em altos níveis, confluência em baixos níveis	Boletim técnico CPTEC; APAC
26/04/2020	Cavado no escoamento de leste, divergência em altos níveis, confluência em baixos níveis, ZCIT	Boletim técnico CPTEC; APAC
23/05/2020	Transporte de umidade proveniente do escoamento de leste, confluência em baixos níveis e divergência em altos níveis	Boletim técnico CPTEC; APAC
07/06/2020	DOL e cavado em altos níveis	Boletim técnico APAC
14/06/2020	Ventos de sudeste em baixos níveis, DOL e cavado em altos níveis	Boletim técnico CPTEC; APAC
15/06/2020	POAs, DOL e cavado em altos níveis	Boletim técnico CPTEC; APAC
05/07/2020	DOL	Boletim técnico APAC
18/07/2020	DOL	Boletim técnico APAC