

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
Docente: Profa. Dra. Ligia Vizeu Barrozo

**Avaliação da dinâmica pluviométrica e hidrológica da bacia do Rio Pindaré (MA)
concernente à incitação de movimentos de massa**

Trabalho de Graduação Individual

MAX LEVIN - 13644632

São Paulo

2025

Sumário

Introdução e Área de Estudo.....	3
Procedimentos Metodológicos	6
Resultados e Discussão	13
Conclusão	29
Referências Bibliográficas	30

Introdução e Área de Estudo

Movimentos de massa e escorregamentos causam prejuízos econômicos, sociais, ambientais e até perdas de vida (Froude e Petley, 2018). A ocupação de áreas com relevo acidentado e os efeitos das mudanças climáticas, incluindo o aumento da frequência na ocorrência de eventos extremos, têm intensificado a ocorrência dos escorregamentos (Wang et al., 2023). Esses eventos podem acontecer em maciços de solo ou rocha e, depois de deflagrados, podem causar danos sociais, econômicos e ecológicos como: destruição de casas, rodovias, ferrovias, estrutura de barragens, dutos de abastecimento de água, óleo e gás (Ho et al., 2017).

No caso de obras lineares, como ferrovias, sempre há trechos de cortes e aterros que estão sujeitos a desastres associados com deslizamentos (Palin et al., 2021). A Estrada de Ferro Carajás (EFC) detém grande importância econômica na escala nacional e internacional, sendo uma ferrovia de mais de 970 quilômetros especializada em transporte de minerais extraídos nas minas da Serra dos Carajás para a exportação. Adicionalmente, é uma das maiores ferrovias de transporte de passageiros no Brasil. Segundo Fernandes (2021), foi transportado pela EFC um total de 86.027 mil toneladas (em TU – tonelada útil tracionada) de produtos da Companhia (2020: 83.026 mil toneladas) e 59 mil passageiros (2020: 79 mil) de janeiro a junho de 2021. Ademais, o percurso da ferrovia percorre áreas onde há frequência de ocorrências de movimentos de massa acima da média, facilmente observado no Atlas Digital de Desastres no Brasil (MIDR, 2023).

Devido à importância da ferrovia, sempre há procura de novos e mais robustos modelos de suscetibilidade a deslizamentos em toda a área. A conglomeração de dados de todos fatores contribuintes aos movimentos de massa é essencial, porém dentre os fatores que influenciam no processo de escorregamento pode-se destacar a elevação do nível piezométrico cujo principal causador é o aumento do índice pluviométrico (Guidicini & Nieble, 1984). Diversos estudos apresentam correlações entre chuvas e movimentos de massa que, apesar de empíricas, são importantes para entender o efeito da chuva acumulada na predição de escorregamentos de terra (Tatizana et al., 1987; D'Orsi, 2011). Entre os diversos produtos destes estudos destacam-se, em termos de impacto na compreensão da dinâmica pluviométrica e hidromórfica de uma determinada área para os propósitos deste projeto, a geração de mapas de precipitação acumulada média, curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), assim como o mapeamento de índices pluviométricos e hidromórficos. Estes, correlacionados, contribuem para a determinação das áreas mais impactadas por estas dinâmicas, portanto mais vulneráveis a movimentos de massa.

Devido à imensidão da escala da ferrovia em questão, a pesquisa irá limitar-se à área da bacia do Rio Pindaré, região importante devido a sua elevada concentração de ocorrências de deslizamento e boa distribuição de estações pluviométricas fornecedoras de dados essenciais. A bacia é localizada no estado do Maranhão, onde o rio Pindaré percorre cerca de 466,3 km até atingir a sua foz no rio Mearim, possuindo aproximadamente 40.482 km^2 de área de drenagem total. Entre seus principais afluentes estão os rios Buriticupu, Negro, Paragominas, Zutiua, Timbira, Água Preta e Santa Rita (Abreu, 2013).

O objetivo geral de estudo, portanto, trata-se da avaliação da dinâmica pluviométrica e hidrológica concernentes aos deslizamentos que ocorreram ao longo da seção da EFC que percorre a bacia descrita acima. Isto será realizado por meio da produção de mapas, índices e interpretação de dados pluviométricos levantados, complementados por hidrográficos. Portanto, a coleta informacional de dados sobre deslizamentos e, sobretudo, a composição de uma base comprehensiva de dados pluviométricos se demonstra essencial para o estabelecimento de correlações entre os fenômenos. Em parte, trata-se disso as pretensões deste projeto. O foco desta pesquisa, reafirmo, é na ação da precipitação e consequente distribuição da água sobre a área nos deslizamentos; demais fatores são abordados por outros projetos.



Figura 1: Localização da bacia do Rio Pindaré, Estrada de Ferro Carajás e Rio Pindaré, Maranhão, Brasil. Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (2025).

A precipitação na bacia tende a seguir uma sazonalidade bem pronunciada, com uma estação úmida que segue de dezembro a maio e uma estação seca que segue de junho a novembro. Esta distribuição de pluviosidade pode ser claramente identificada na figura 2. É coerente, portanto, que a maioria dos deslizamentos tende a ocorrer nos meses úmidos.

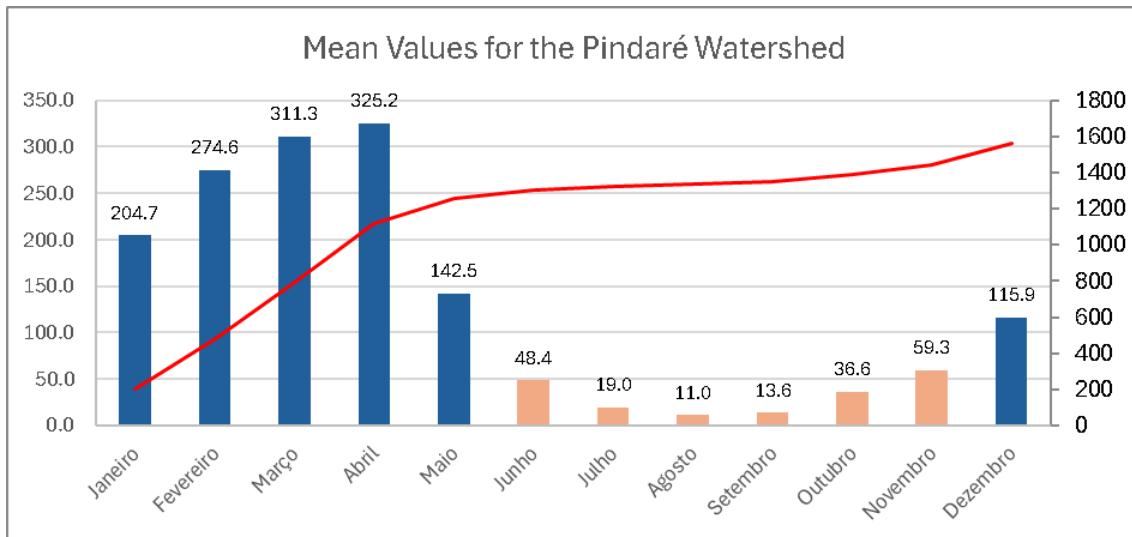


Figura 2: Acumulados mensais médios do período escolhido de 2001 a 2011. Em azul a estação úmida, em rosa, a seca. Linha vermelha significa o acumulado anual total. Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025).

Dentro da bacia do Rio Pindaré, a seção da EFC estudada percorre dois municípios no estado do Maranhão: Bom Jesus das Selvas e Buriticupu. As seguintes informações foram extraídas do Censo Demográfico de 2022 realizado pelo IBGE (IBGE, 2022), com revisão/estimações ajustadas em 2025. Bom Jesus das Selvas tem população estimada de 29.606, densidade demográfica de 10,68 pessoas por km² e PIB per capita de R\$ 10.706,25. Já Buriticupu tem população estimada de 56.733, densidade demográfica de 21,81 pessoas por km² e PIB per capita de R\$ 10.165,53. Tratam-se de municípios com pouca área urbanizada relativa à área total, porém este é o caso especialmente para Bom Jesus das Selvas. Buriticupu tem mais do dobro de área urbanizada e densidade demográfica, com menor área total, porém menor PIB per capita e salário médio mensal. As cidades ou concentrações populacionais de ambos municípios ficam relativamente próximas ao rio e à EFC (de 4 a 9 quilômetros), ambos municípios também hospedam estações pluviométricas cujos registros foram utilizados nesta pesquisa.

Procedimentos Metodológicos

O tratamento e análise dos dados pluviométricos das estações superficiais, assim como daqueles providos de produtos orbitais, exige primeiramente a sua coleta. Estes processos foram realizados simultaneamente. Começando com as estações, a série histórica dos registros foi obtida por meio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em sua plataforma HIDROWEB, que disponibiliza arquivos de formato .mdb (ANA, 2025). Estes, por sua vez, foram em seguida descompactados no software HIDRO em planilhas facilmente convertidas para formatos compatíveis com Excel (onde o restante da análise e correlação dos dados é realizado).

São diversas as estações dentro ou próximas do perímetro escolhido com dados plenamente disponíveis. Para cobrir toda a área da bacia na geração de mapas de interpolação (que será discutida adiante) foi necessário encontrar uma boa distribuição espacial em relação à bacia. Também foi feita a avaliação da qualidade e consistência dos dados de cada estação, já que certas estações apresentam maior proporção de erros ou ausências nas medições. Levando isto em conta, foram 17 as estações escolhidas.

ID	Estação	Nome	Tipo	Operando	Latitude	Longitude
1	245001	Alto Turi	Pluviométrica	Sim	-2,95	-45,66
2	344012	Miranda	Pluviométrica	Sim	-3,59	-44,58
3	345000	Aratoí Grande	Pluviométrica	Sim	-3,77	-45,22
4	345006	Pindaré Mirim	Pluviométrica	Sim	-3,66	-45,44
5	345012	Boa Vista do Pindaré	Pluviométrica	Sim	-3,40	-45,01
6	345013	Newton Bello	Pluviométrica	Sim	-3,42	-45,67
7	346002	Tucumá	Pluviométrica	Sim	-4,22	-46,17
8	445001	Esperantina	Pluviométrica	Sim	-4,03	-45,77
9	445008	Arame	Pluviométrica	Sim	-4,86	-46,01
10	446000	Ponte BR-222	Pluviométrica	Sim	-4,30	-46,49
11	446002	Vale do Pindaré	Pluviométrica	Sim	-4,70	-46,94
12	446001	Fazenda Pedreiras	Pluviométrica	Sim	-4,41	-46,75
13	447002	Reta Km-32	Pluviométrica	Sim	-4,83	-47,27
14	447004	Açailândia	Pluviométrica	Sim	-4,93	-47,50
15	546007	Sítio Novo	Pluviométrica	Sim	-5,88	-46,70
16	547000	Imperatriz	Pluviométrica	Sim	-5,54	-47,48
17	547005	Buritirama	Pluviométrica	Sim	-5,59	-47,02

Figura 3: Seleção de estações pluviométricas. Fonte: elaborado pelo autor.

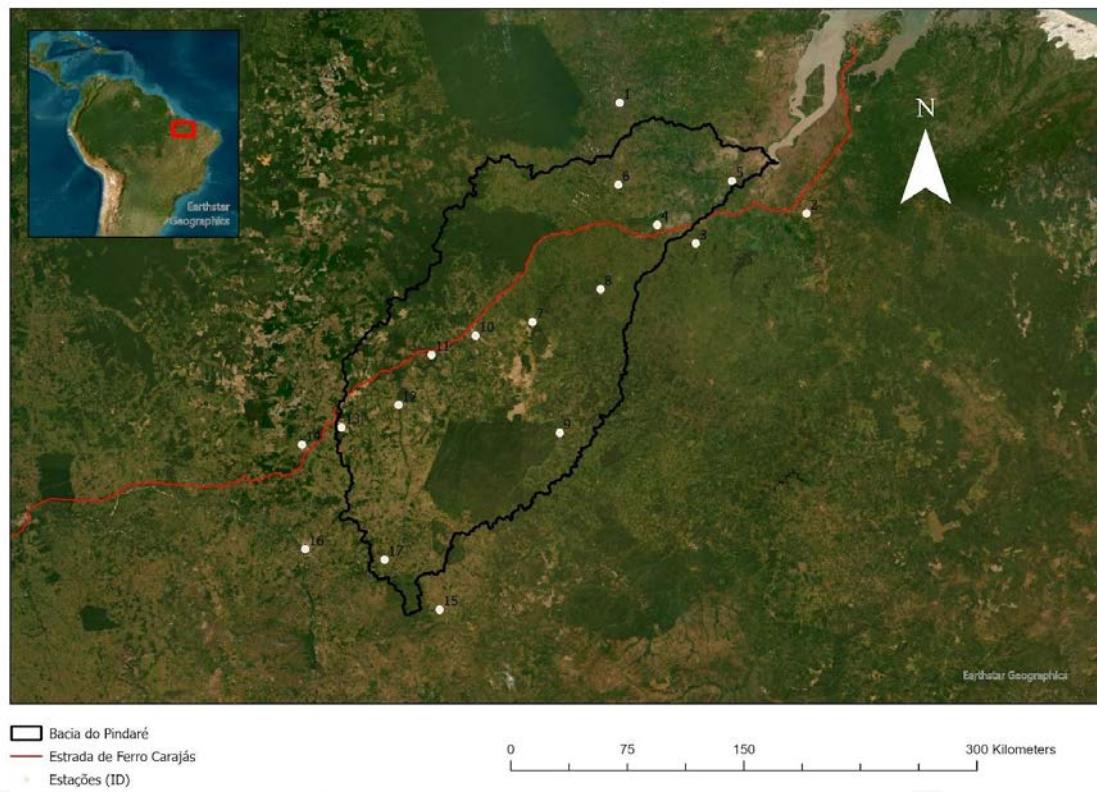


Figura 4: Localização da seleção final das estações pluviométricas utilizadas. Fonte: elaborado pelo autor.

Datas	Chuva (mm/dia)
12/05/2002	3,2
13/05/2002	4,3
14/05/2002	0
15/05/2002	0
16/05/2002	0
17/05/2002	26,1
18/05/2002	0
19/05/2002	15
20/05/2002	0
21/05/2002	0
22/05/2002	7,2
23/05/2002	0
24/05/2002	0
25/05/2002	56

Figura 5: Parte de série histórica pluviométrica diária da estação de Boa Vista do Pindaré (período utilizado: 2001-2011). Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da coleta destes dados foi feita clara a necessidade de um processo de preenchimento das muitas falhas/ausências de registro. Antes de fazer isto, foi escolhida a janela de 2001-2011 como o período de dez anos com o relativo menor número de erros. Esta escolha foi informada também pela realização do seguinte diagrama de Gantt:

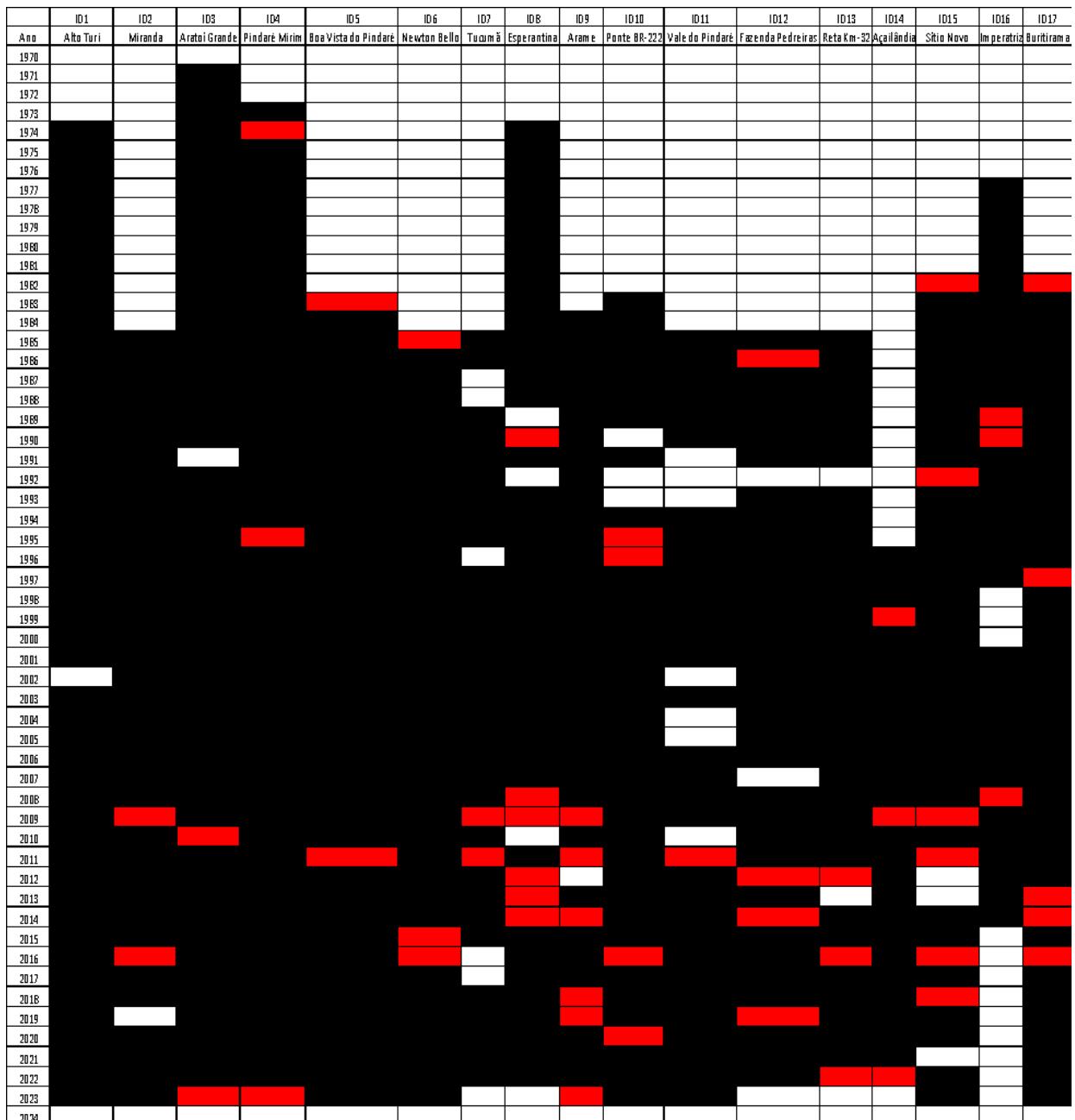


Figura 6: Diagrama de Gantt ilustrando histórico de registros e falhas/ausência de registros das estações pluviométricas entre 1971 e 2024. Fonte: elaborado pelo autor.

Legenda:	Completo
	Até 30 Erros
	Mais de 30 Erros

Em seguida foi realizado o preenchimento dos erros. Foram testados e comparados os métodos de ponderação regional, regressão linear simples e regressão linear múltipla, onde a ponderação regional provou-se a mais adaptada aos dados (Teegavarapu et al, 2005). Este método foi aplicado assim: tomada de medidas de acumulação mensal (do mês do erro) de três ou mais estações próximas daquela que teve a falha para todos os dez anos do período selecionado, seguido pelo cálculo da média (não considerando as medidas do ano do erro) para cada estação. A partir dessa organização de dados foi estimada a precipitação do mês com falha: com a divisão pelo número de estações próximas (de 3 a 5) da soma das medidas do mês de falha de todas estações próximas dividido pela média do mês de falha média destas mesmas estações; tudo isso é então multiplicado pela média do mês de falha da estação de falha. A seguir, apresento o exemplo do preenchimento da falha em julho de 2009 da estação Arame (ID 9):

1	A	B	C	D	E
2		Arame	Ponte BR 222	Tucumã	Fazenda Pedreiras
3	jul/01	0	6,6	16,2	0
4	jul/02	23,2	44,7	41,5	23,1
5	jul/03	0	0	15	0
6	jul/04	0	32,9	43	26,6
7	jul/05	0	0	0	0
8	jul/06	24,8	5,9	19	0
9	jul/07	0	0,8	4,9	0
10	jul/08	0	0	6,8	0
11	jul/09	8,5	8,4	26,7	11,3
12	jul/10	24,1	22,5	29	19,3
13	jul/11	8,3	57,1	37,9	11,1
14	Média	8,04	17,05	21,33	8,01

Onde $8,5 = (1/3) * (C11/C14 + D11/D14 + E11/E14) * B14$

Tabela 1: Preenchimento da falha em julho de 2009 da Estação Arame a partir de registros das estações próximas. Fonte: elaborado pelo autor.

Após o preenchimento dos erros, em interesse de confirmar a coerência da climatologia da área analisada enquanto se trata de distribuição pluviométrica, foi realizada a medição e visualização da consistência dupla massa mensal dos dados das estações. Isto foi feito pela comparação da chuva acumulada de cada mês de cada estação com a chuva acumulada mensal de um hipotético posto médio, a média da chuva acumulada mensal de todas as estações pluviométricas. Também foi realizada esta mesma correlação com um posto médio próximo, que toma para sua média apenas estações próximas da estação correlacionada (2 ou 3, dependendo da localização de cada estação).

Com a consistência dupla massa realizada e as falhas dos dados das estações preenchidas, se tornou possível a interpolação dos mesmos para a elaboração de uma estimativa de pluviosidade ao longo de toda a bacia, não restrita aos dados brutos (ou preenchidos) dos 17 pontos das estações. O conjunto da precipitação média acumulada de cada ponto/estação foi em seguida interpolado ao longo de toda área do estudo. Estas interpolações possibilitam a visualização da distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia; como esta varia de acordo com sazonalidade, de mês em mês ou qual é sua tendência geral com base nos dados coletados.

Foram realizadas interpolações com os dados das 17 estações pluviométricas do período escolhido (2001-2011). Estes foram tratados, com suas médias mensais, sazonais e anuais de acumulado pluviométrico calculadas por meio do Excel. Para cada mês, foi utilizado o acumulado mensal médio. Com a interpolação sazonal para as estações úmida e seca foram utilizados o acumulado médio de todos os meses que compõem as respectivas estações. Por fim, para a interpolação anual foi utilizado o acumulado médio anual.

Este processo foi realizado por meio do software ArcGIS Pro, também utilizado para a criação de todos os mapas presentes neste relatório. Este software disponibiliza ferramentas que realizam, desde que providos os dados em formato adequado, diversos métodos de interpolação de maneira rápida e precisa. Também foram necessários, para a realização destes produtos, arquivos *shapefiles* delimitadores da área de estudo, neste caso da bacia, que serviu de recorte para as interpolações produzidas. Estes foram obtidos devido à colaboração com o grupo de pesquisa em Engenharia Geotécnica GeoInfra USP.

Foram testados e comparados uma série de métodos de interpolação, porém o Ordinary Kriging (Krigagem) foi considerado o melhor adaptado considerando o banco de dados, a plataforma disponível e pesquisas de comparação dos métodos realizados em diversas áreas do mundo, dando preferência ou maior importância para climatologias que mais se aproximam do cenário climatológico amazônico da bacia (Ly et al, 2011; Antal et al, 2021; Tabios, et al, 1985; Yang et al, 2021; Chahouki et al, 2014; Plouffe et al, 2015; Wijemannage et al, 2016).

Em seguida, foram elaboradas curvas Intensidade-Duração e Frequência (IDF) para cada ponto onde estão localizadas as estações pluviométricas. O objetivo destas curvas é de facilitar a visualização da dinâmica de intensidade diante a frequência e a duração de uma chuva, considerando que o tempo de retorno tem uma correlação positiva com intensidade, enquanto que a duração apresenta correlação negativa ou inversa (Chow et al., 1988). Estas curvas detalham, portanto, a dinâmica de intensidade diante a frequência e a duração de uma chuva para os pontos onde há dados verificados ao longo da área de estudo, possibilitando a comparação e/ou observação de padrões entre estes. As curvas foram realizadas no Excel com base na equação $I=a \cdot TR^b(c+t)^d$, onde I =Intensidade da chuva (mm/h), TR =Tempo de retorno da chuva (anos) e t =tempo

de duração da chuva (minutos), enquanto a , b , c e d são os parâmetros da IDF particulares de cada local (Chow et al., 1988).

A partir da série histórica de dados de precipitação das coordenadas de cada estação pluviométrica selecionada foi obtida a chuva máxima de cada ano da série histórica escolhida para cada ponto. Através de inserção de planilhas (formato .csv) Ano-Chuva Máxima (gerada a partir da série histórica diária preenchida, veja figura 5) no software *Genetic Algorithm Methodology for IDF* (GAM-IDF), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas da Universidade Federal de Pelotas (GAM IDF, 2020), obteve-se os valores a , b , c e d particulares de cada ponto. Determinando uma escala de duração de 5 a 1440 minutos (um dia) e TRs e 2, 5, 10, 20, 50 e 100, foram realizadas as curvas IDF. Além de separadas por localização (incluindo todos TR), as curvas também foram organizadas por TR (incluindo todas estações). Três entre os 17 pontos de estações não puderam ser utilizados, devido a apresentarem tendência em sua série Ano-Chuva máxima por meio do teste de Mann Kendall ao nível de 5% de significância.

Na última etapa de produção prática do projeto, foram elaborados os índices de Topographic Wetness Index (TWI) e Normalized Difference Wetness Index (NDWI), ambos a partir do modelo digital de elevação (MDE) do satélite ALOS PALSAR baixado online (JAXA, 2018). Estes índices são úteis para determinar os padrões de drenagem e as áreas de maior umidade ou acumulação dentro do perímetro escolhido (Guassselini et al, 2020; Wang et al, 2015), complementando os mapas de chuva acumulada e contribuindo para a formação de uma comprehensiva caracterização das dinâmicas hidrológicas da área.

Neste ponto da pesquisa, a escala de estudo tornou-se a um buffer de 500 metros ao longo de um percurso da EFC que demandou maior foco, devido à concentração de deslizamentos observados pelo inventário histórico de ocorrências montado pelo grupo de pesquisa Geolnfa USP. Trata-se do percurso entre os quilômetros 369 e 414, que atravessa parte dos municípios de Bom Jesus das Selvas e Buriticupu. Em contraste com os mapas de interpolação que compreendem uma dinâmica de maior escala (bacia), estes índices apontam dinâmicas locais determinadas por característica topográficas específicas, justificando uma área de análise mais detalhada. Todas as atividades descritas a seguir fizeram uso de ferramentas do ArcGIS Pro, assim como de assistência da inteligência artificial GISGPT para a elaboração de scripts de código Python, ferramenta integrada ao ArcGIS Pro.

O TWI trata-se de um índice que estima a distribuição do acúmulo de água numa determinada área por meio das características topográficas da mesma, identificando locais de possível saturação hídrica (Sørensen et al, 2006). A acurácia do índice, portanto, depende diretamente da qualidade dos dados topográficos e da adequação dos algoritmos de fluxo utilizados (Riihimäki et al., 2021). Devido a isto, a geração deste índice exigiu primeiro a obtenção dos fatores de declividade, direção de fluxo e acúmulo de fluxo para a área de estudo focada. Todos estes fatores foram gerados e testados antes de serem utilizados na composição do índice no ArcGIS Pro a partir dos dados de elevação do MDE mencionado (ALOS PALSAR).

O NDWI é um índice utilizado na visualização de variações no teor de água, seja em vegetação ou em corpos d'água, calculado a partir de imagens de sensoriamento remoto. Ele baseia-se em bandas espectrais, portanto mede propriedades ópticas da superfície ligadas à água (Gao, 1996). Para o NDWI foram extraídas as bandas verde e infravermelho próximo de imagem do satélite CBERS-4A WPM, escolhida entre diversas por cobrir toda a área de estudo, por ter pouca cobertura de nuvens e por sua recência (últimos 4 anos). Estas imagens, assim como o download de rasters de bandas individuais, são disponibilizadas para o público através do catálogo de imagens de satélite no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2025). A partir disso, utilizando a ferramenta Raster Calculator, o índice foi gerado realizando a fórmula $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$.

Após isto, com o objetivo de quantificar a distribuição espacial da suscetibilidade a deslizamentos para ambos estes índices, foram calculadas as áreas totais correspondentes a cada classe (ver nas legendas das figuras X e Y) e a proporção de áreas com ocorrência de deslizamentos para cada classe. Para a determinação de áreas de deslizamentos, esta etapa fez uso de um inventário de shapefiles de delimitação de deslizamentos já desenhados e providos pelo GeoInfraUSP. Portanto, para o TWI e NDWI, com base nas ferramentas de tabulação da área de classes (Tabulate Area) no ArcGIS Pro, foram obtidos os valores (totais e em porcentagem) da área de cada classe, assim como a área de deslizamento (ocorrências) presente em cada classe.

A área total de deslizamentos classificada para cada fator foi gerada aplicando a ferramenta Extract by Mask, usando como input o raster da área total e como feature mask data os shapefiles de delimitação de deslizamentos já desenhado pelo GeoInfraUSP. Após isso e a reclassificação (usando a ferramenta Reclassify) para garantir as mesmas classes nos shapefiles de deslizamentos e da área total, a mesma tabulação de área por classes foi realizada para os deslizamentos. Os resultados foram inseridos numa planilha Excel, onde foram obtidos valores de porcentagem de contribuição à área total e à área de deslizamentos de cada classe de cada fator.

Vale a pena notar que parte destas atividades foram feitas em colaboração com o laboratório GeoInfraUSP, com a finalidade de contribuir à um mapa de suscetibilidade realizado a partir da metodologia Weight of Evidence (WoE), como descrita por Wu et al (2020). Esta tira proveito dos dados de tabulação de área e deriva destes pesos relativos para a incitação de deslizamentos (W_f) entre os fatores. Além dos fatores aqui explorados (TWI e NDWI), foram tabulados a área e obtidos os pesos relativos de mais 17, mais tarde utilizados para a geração de um mapa de suscetibilidade a deslizamentos da área que os integra. Como a maior parte destes fatores não foram gerados por mim, e a metodologia WoE requer a junção de uma série, este trabalho foca apenas nos produtos dos índices em si e das interpolações realizadas, não da integração de múltiplos fatores condicionantes.

Resultados e Discussão

Em termos de material visual, os resultados consistem, principalmente, em curvas de consistência dupla massa mensal, mapas de interpolação, curvas IDF, índices TWI e NDWI. Começando com as curvas de consistência dupla massa mensal, a realização destas foi essencial para a fundamentação de toda a premissa do projeto, já que, ao provar a relativa coerência no comportamento das chuvas ao longo da área analisada, este produto demonstra assim que a utilização de dados de demais estações para a estimativa de falhas e, em seguida, para a interpolação, é justificável.

Foram produzidas duas curvas para cada uma das 17 estações pluviométricas, com posto médio geral (média da chuva acumulada mensal de todas as estações pluviométricas) e posto médio próximo (média das 2 ou 3 estações mais próximas), como detalhado na metodologia.

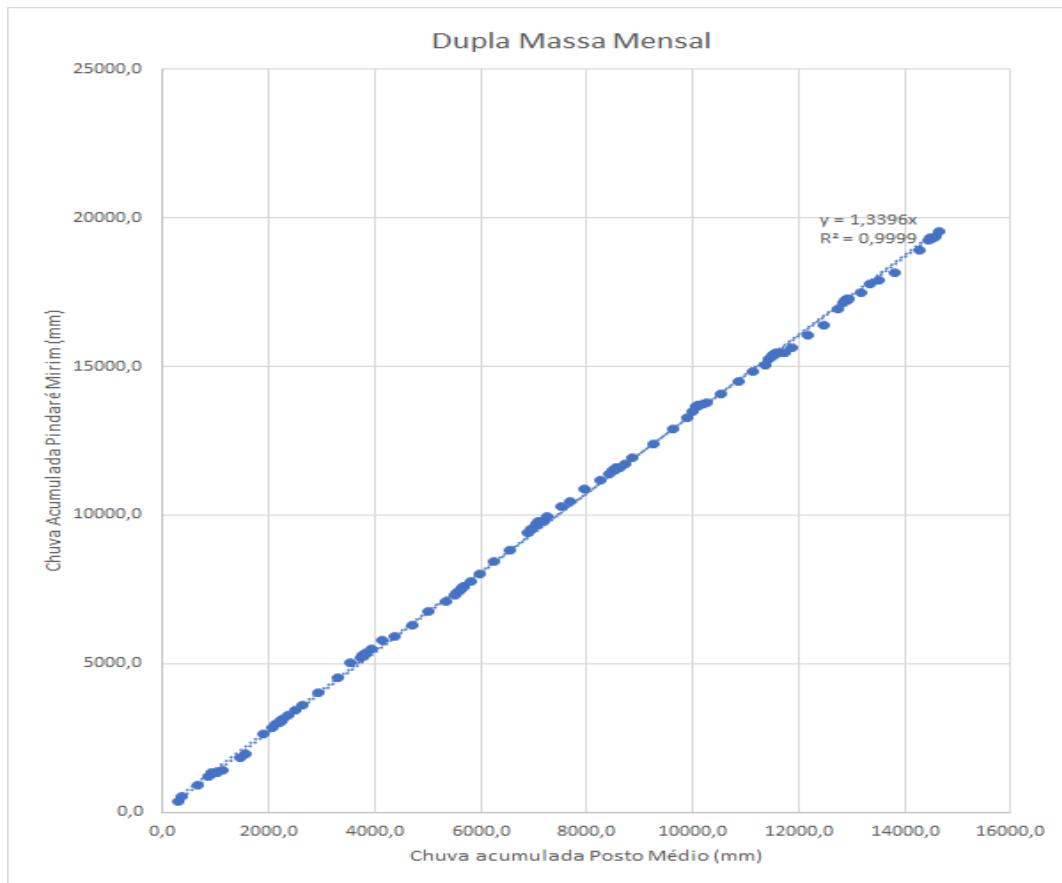


Figura 7: Consistência Dupla Massa Mensal comparando a estação Pindaré Mirim com o posto médio geral (média de todas estações). Fonte: elaborado pelo autor.

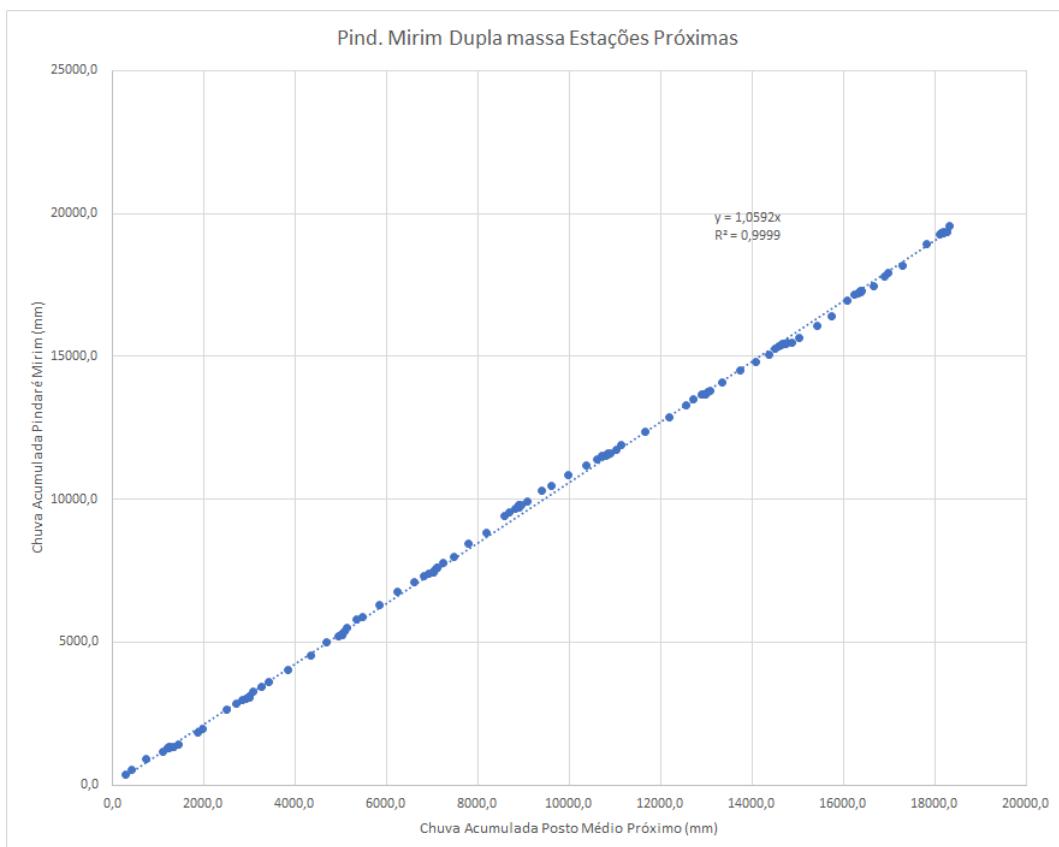


Figura 8: Consistência Dupla Massa Mensal comparando a estação Pindaré Mirim com o posto médio próximo (média das estações Boa Vista do Pindaré, Esperantina, Newton Bello). Fonte: elaborado pelo autor.

Como demonstrado pelas figuras exemplo acima, os resultados da consistência mensal das estações em comparação com o posto médio geral demonstraram-se excelentes, com resultados de correlação de chuva acumulada bons para quase todas as estações analisadas, a única discutível exceção sendo a estação Arame, onde $y=0,7464x$ (y =chuva acumulada de Arame e x =chuva acumulada do posto médio). O seu coeficiente de determinação, porém, foi excelente de qualquer maneira, com $R^2 = 0,9955$. Os resultados da consistência mensal das estações utilizando o posto médio próximo foram similares entre todas as estações e estatisticamente bons, com R^2 sempre maiores (mais próximos de 1) que 0,99 para todas as estações, incluindo Arame. Previsivelmente, houve uma melhoria dos resultados da consistência com o posto médio próximo em comparação com o posto médio da área total, mesmo que menor do que esperado, afirmado ainda mais a unidade da dinâmica pluviométrica da área como todo.

Concernente o nível de detalhamento requisito para os objetivos desta pesquisa, isto confirma uma coerência relativa da distribuição pluviométrica na área analisada. Esta coerência entre as estações, em especial entre as mais próximas, é o que possibilita maior confiança nos resultados do preenchimento das falhas de registro das estações, essencial para todas as demais etapas. Além disso, este resultado adiciona à

compreensão da dinâmica pluviométrica da bacia ao mostrar que, apesar de haver variações significantes de distribuição de chuvas dentro desta, nenhuma área (coberta por uma estação) comporta-se drasticamente diferente que as demais.

Foram realizados 15 mapas de interpolação da bacia do Rio Pindaré: um para o acumulado médio de cada mês, um para todos os meses úmidos e um para todos meses secos (critério de determinação baseado na precipitação média acumulada mensal), assim como um para o acumulado médio anual. Reitero que estas interpolações mapeiam a distribuição espacial e temporal da precipitação na bacia; com elas é facilitada a identificação de áreas com mais ou menos chuva, assim como a maneira em que a dinâmica pluviométrica tende a evoluir durante o ano e qual seu comportamento geral. Ressalta-se que, devido ao objetivo sendo a observação da distribuição relativa da chuva na bacia, as escalas são automaticamente ajustadas. Para uma visualização da desigual distribuição de volume pluviométrico ao longo do ano veja a Figura 2.

A seguir dois exemplos de interpolações mensais (janeiro e outubro), interpolações sazonais e interpolação anual média:

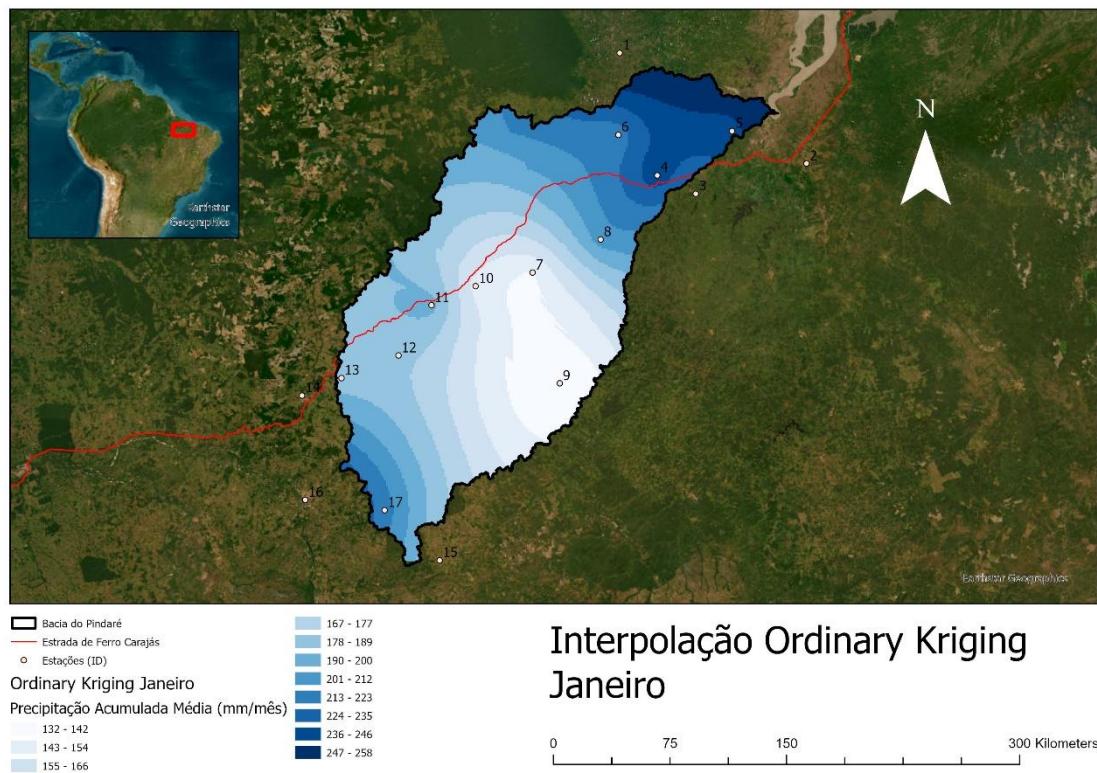


Figura 9: Interpolação Ordinary Kriging (Krigagem) para a precipitação acumulada média (2001-2011) do mês de janeiro. Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).



Figura 10: Interpolação Ordinary Kriging (Krigagem) para a precipitação acumulada média (2001-2011) dos meses de dezembro a maio (estação chuvosa). Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).

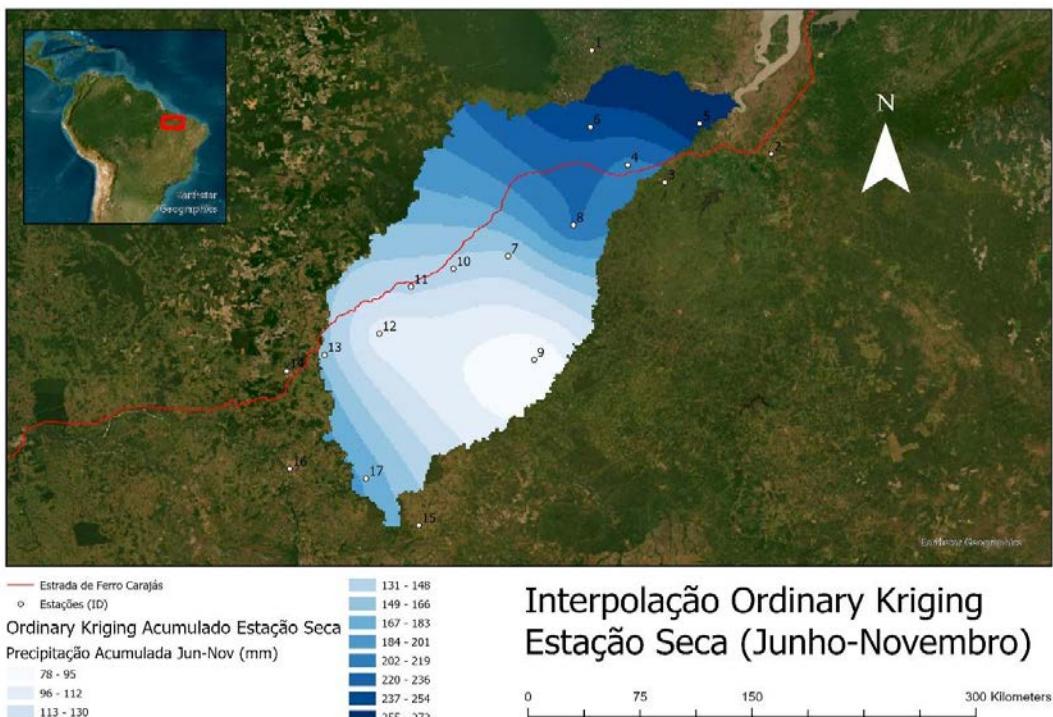


Figura 11: Interpolação Ordinary Kriging (Krigagem) para a precipitação acumulada média (2001-2011) dos meses de junho a novembro (estação seca). Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).

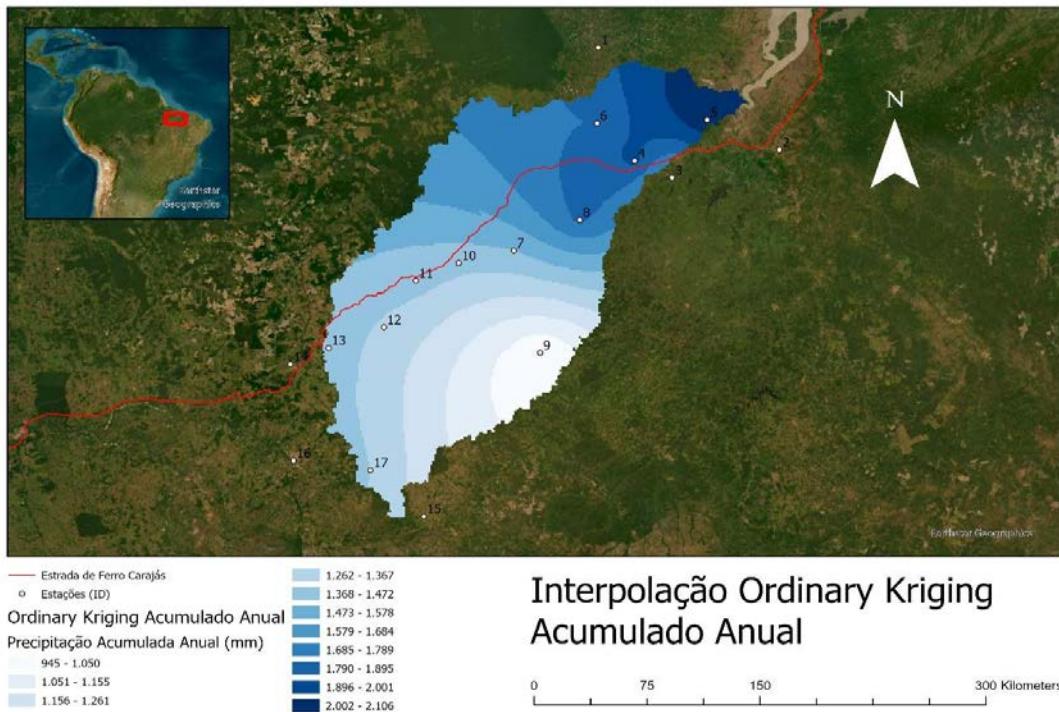


Figura 12: Interpolação Ordinary Kriging (Krigagem) para a precipitação acumulada média (2001-2011) anual. Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).

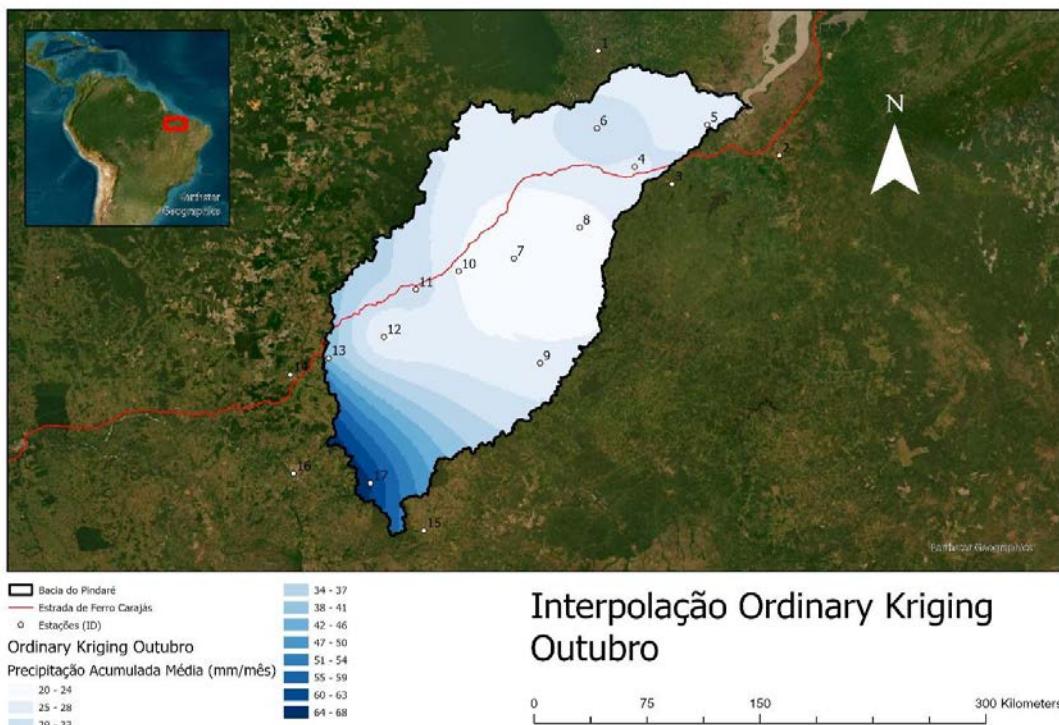


Figura 13: Interpolação Ordinary Kriging (Krigagem) para a precipitação acumulada média (2001-2011) do mês de outubro. Observa-se aqui a quase inversão da tendência geral vista na maioria dos meses (o centro mantém-se seco). Observa-se aqui a baixa quantidade de chuva (vista na

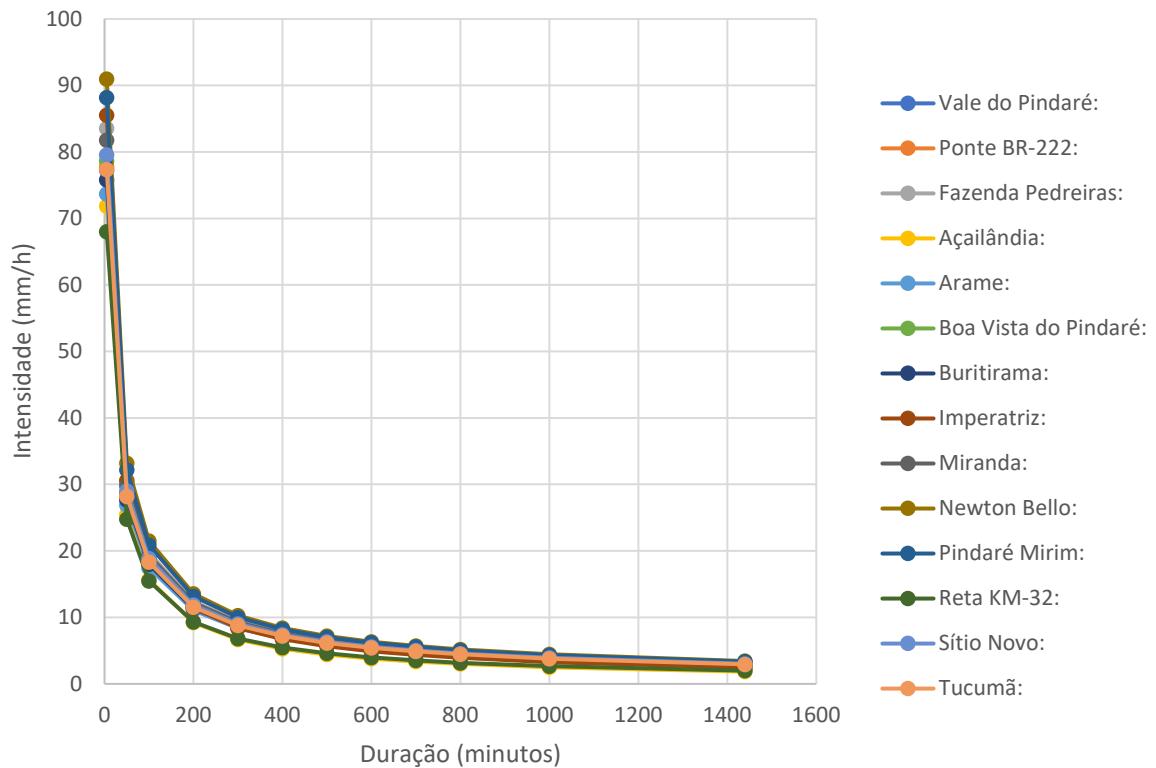
legenda), responsável pela relativa irrelevância desta peculiaridade. Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).

Seguem algumas das observações que podem ser feitas sobre a distribuição espacial pluviométrica na bacia em diferentes escalas temporais, a partir das figuras obtidas: mesmo com quantidades de chuva drasticamente diferentes entre a estação chuvosa e a seca (facilmente notado pelas legendas ou pela figura 2) o comportamento destas não difere radicalmente. Todas as figuras apresentadas acima demonstram maiores concentrações de chuva no norte-nordeste da bacia e menores no sul e especialmente no centro. Esta tendência de distribuição mantém-se na maioria das demais interpolações mensais, a exceção sendo nos meses de outubro a dezembro, onde uma aparente quase inversão ocorre, a área ao sul concentrando mais chuva. Este fenômeno, porém, devido as menores quantidades de chuva dos respectivos meses, tem mínimo impacto nas estimativas sazonais e anual. A interpolação anual, por sua vez, é por razões evidentes muito similar à estação chuvosa, já que esta concentra a grande maioria da chuva total anual.

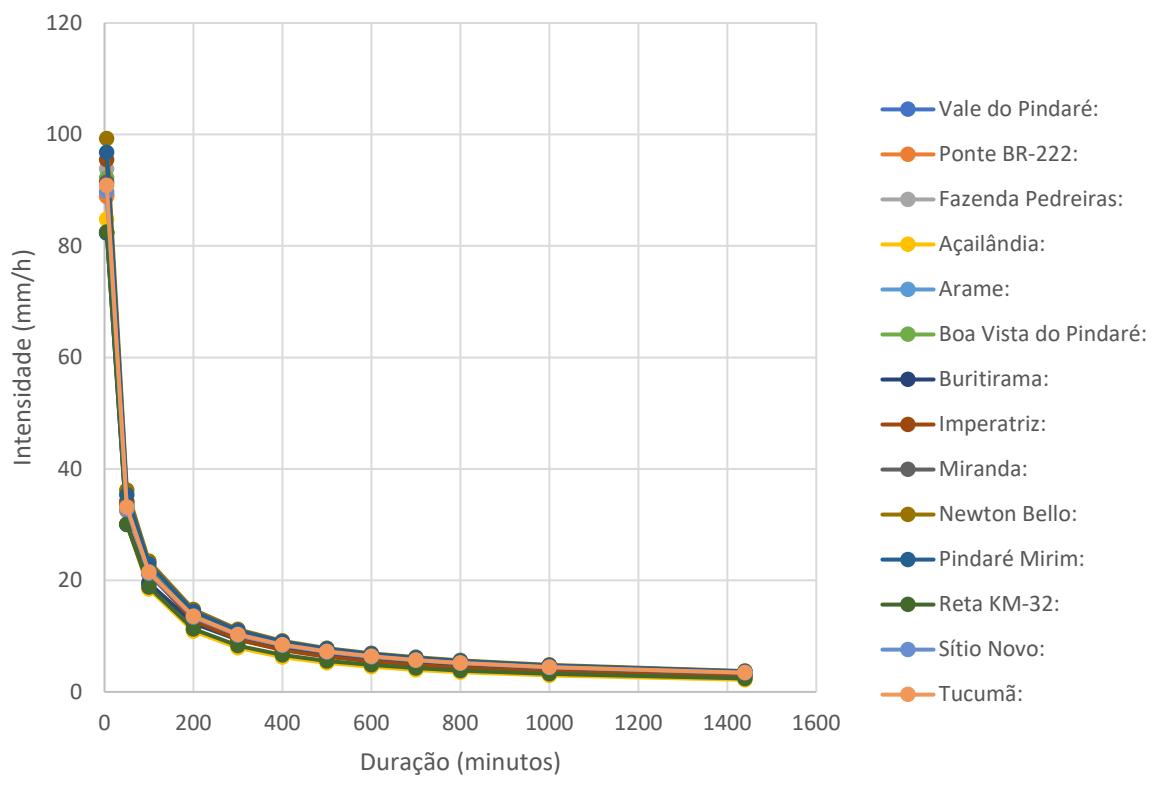
Por fim, além da identificação da dinâmica típica (média) da precipitação em toda a área, a geração destes mapas possibilita a identificação da precipitação acumulada média em múltiplas janelas de tempo para cada ponto (pixel) dentro de toda bacia do Rio Pindaré, contribuindo para estudos em múltiplas escalas.

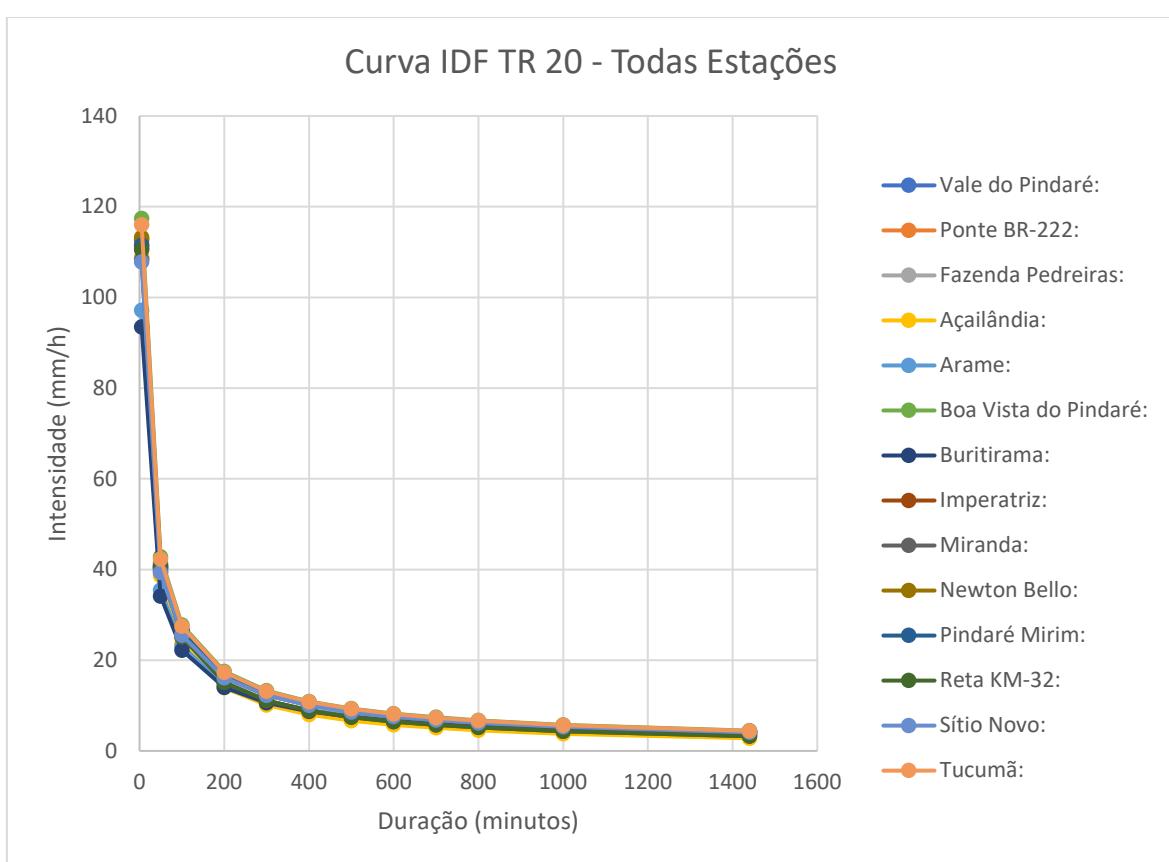
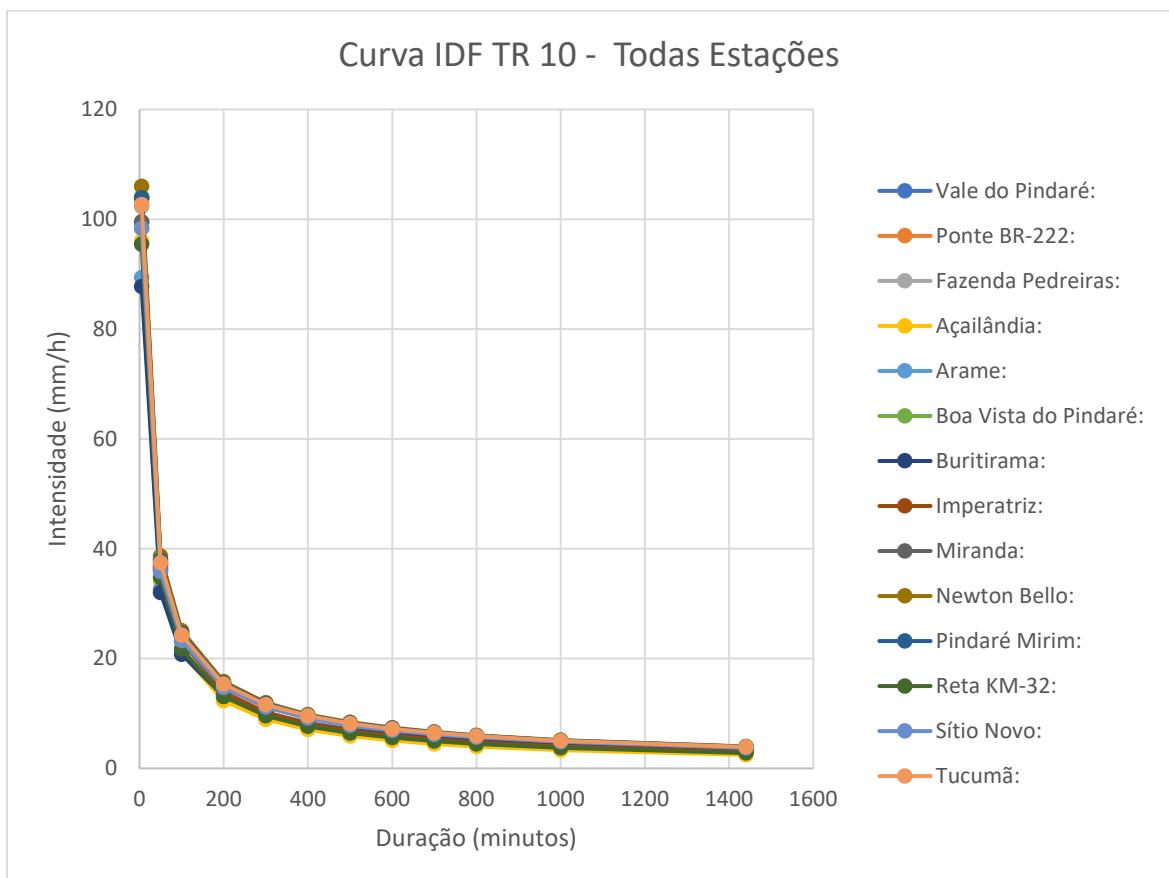
Foram produzidas 14 curvas Intensidade-Duração-Freqüência (IDF) para as estações pluviométricas individualmente, assim como 6 gráficos (múltiplas curvas) de particulares Tempos de Retorno (TR) que incluem todas as estações. No total, são 20 as curvas, com apenas os gráficos de combinação por TR apresentados aqui. Os resultados a seguir possibilitam a visualização da dinâmica de intensidade diante a freqüência e a duração de uma chuva, já que o tempo de retorno tem uma correlação positiva com intensidade, enquanto que a duração apresenta correlação negativa ou inversa.

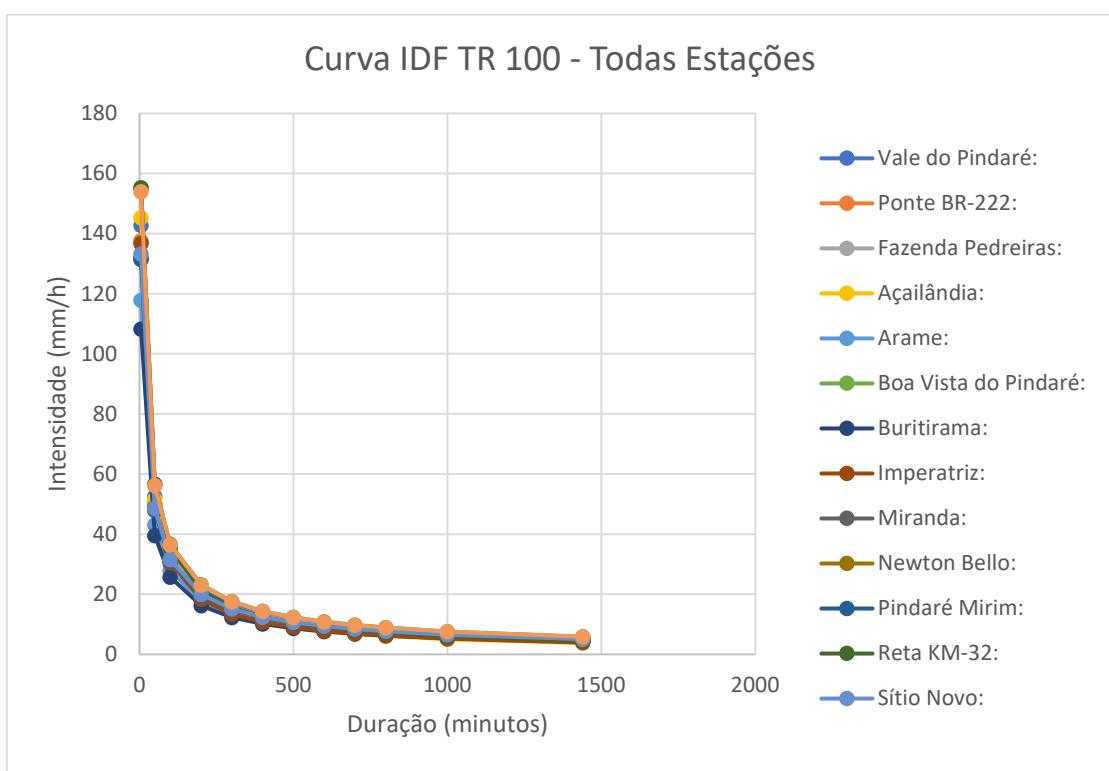
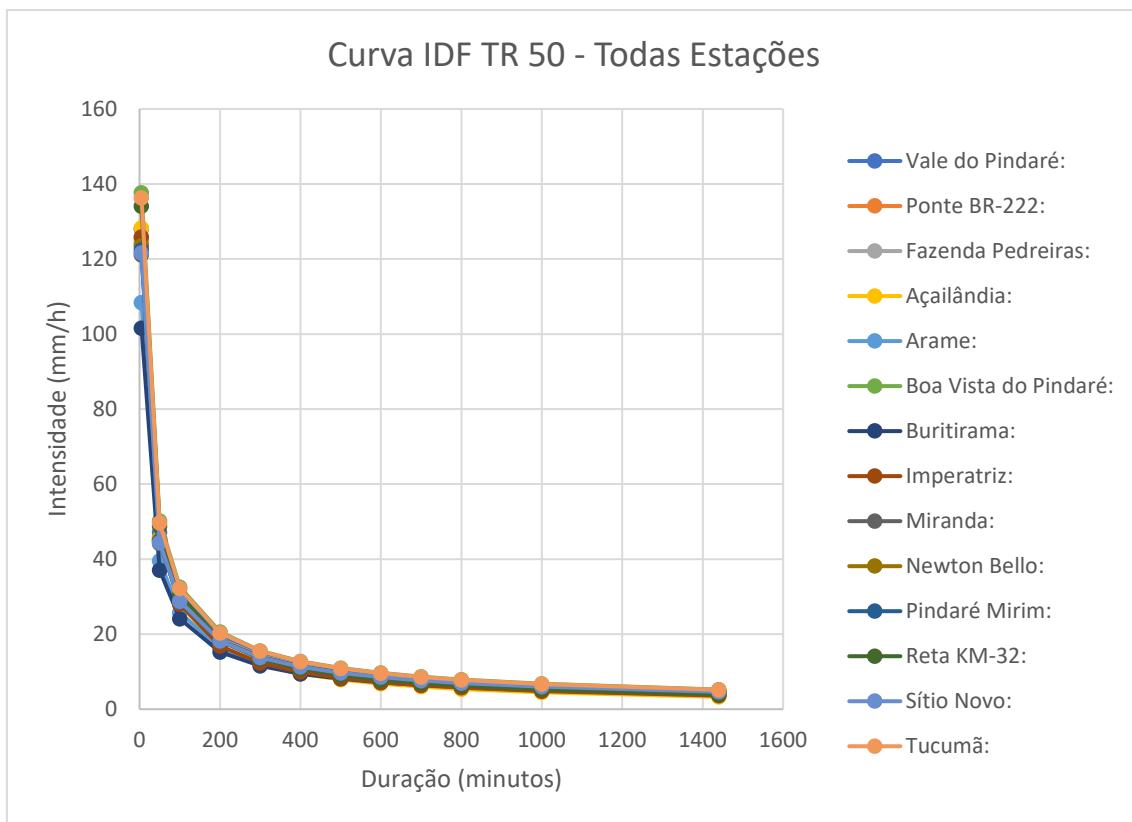
Curva IDF TR 2 - Todas Estações



Curva IDF TR 5 - Todas Estações







Figuras 14 a 19: Curvas IDF para todas estações de TR 2 até TR 100. Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que, entre os TR de 2 a 10 anos o ponto em Newton Bello demonstra-se o mais intenso, já entre TR 20-50 Boa Vista do Pindaré se destaca; por fim em TR 100

o ponto em Reta KM-32 é o mais intenso. Independente de TR, porém, a diferença de intensidade entre os pontos é minimizada conforme a duração estende-se, em todas estações o padrão de decaída de intensidade rápida nos primeiros 100 minutos seguida de decaída menor e estabilização tende a ser o mesmo. Com uma duração de 1440 minutos, por exemplo, a diferença entre a mais e menos intensa estação é sempre inferior a 2 mm, através de todos TR.

Estes resultados consolidam a coerência relativa entre as estações demonstrada pelas curvas de dupla massa mensal discutidas previamente, não apenas acerca de acúmulo de chuva total mas também em comportamentos de intensidade-duração-força. As diferenças significativas entre estações limitam-se a eventos de relativa curta duração: nos primeiros minutos de um evento até a primeira hora de duração, as diferenças em intensidade podem ser de múltiplas dezenas de mm/h.

Por fim, os índices TWI e NDWI consistem em apenas um mapa cada. Como dito antes, os índices expõem padrões de drenagem e áreas de maior umidade ou acumulação, complementando a informação fornecida pelos mapas de interpolação de chuva acumulada e contribuindo para uma detalhada compreensão da dinâmica pluviométrica e hidrológica da área. Interpretados e apresentados aqui estão os índices na seção de foco onde concentram-se o maior número de deslizamentos, porém este índice foi produzido para toda a bacia e além (para um buffer de 500 metros ao longo de toda ferrovia).

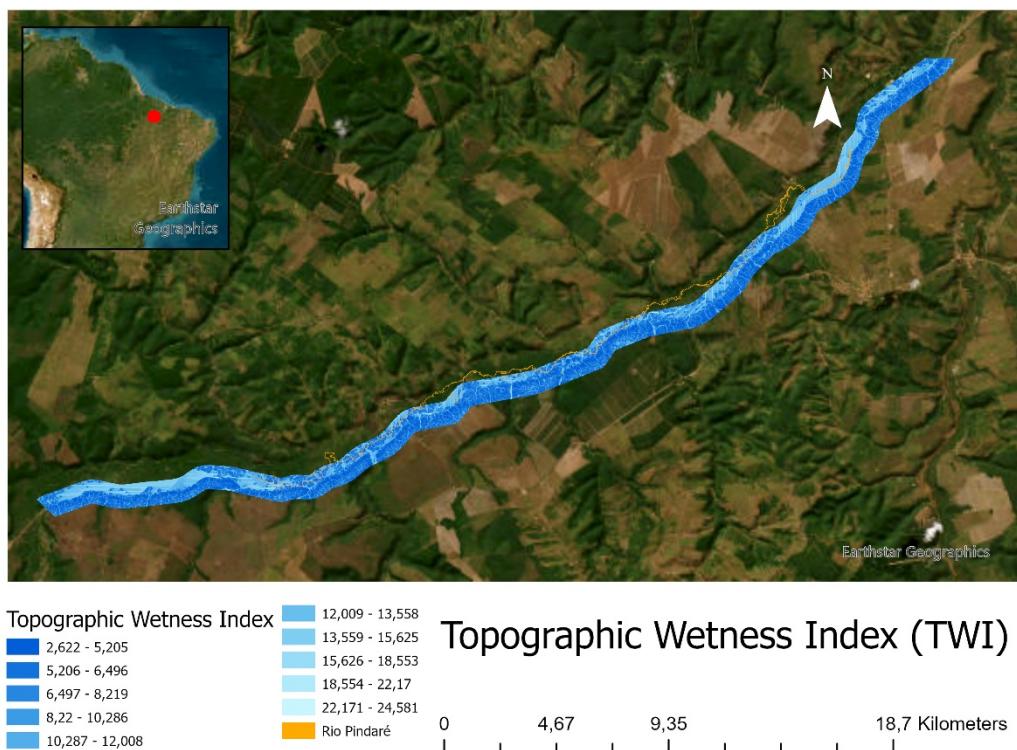


Figura 20: Distribuição espacial do Topographic Wetness Index (TWI) ao longo de um trecho de 41 km da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).

Entre as observações realizadas com esta inicial geração do primeiro índice, quando este é colocado junto ao Rio Pindaré, nota-se um padrão visível de aumento de umidade acumulada nas áreas próximas ao mesmo. Afim de obter confirmação desta tendência, assim como separar e identificar seções da ferrovia mais ou menos afetados por dinâmicas de acumulação de água após precipitação, o trecho foi subdividido em 13 Áreas de Ferrovia (AF) e os resultados do índice foram colocados em planilha. Afim de correlacioná-los com a distância ao Rio Pindaré, também foi gerado mapa e dados de distância às delimitações do rio para cada píxel da área buffer.

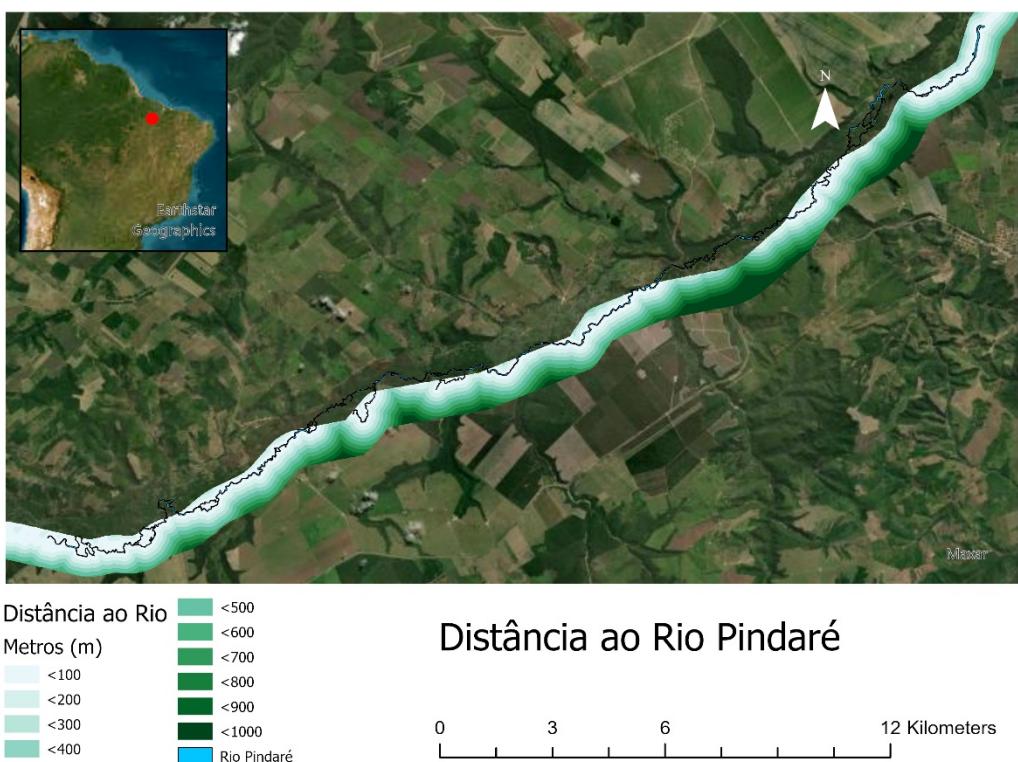


Figura 21: Distância ao Rio Pindaré em metros ao longo do trecho em que a EFC corre paralelo a este.
Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (2025).

Os seguintes resultados, tratando do Topographic Wetness Index e da distância da ferrovia ao rio, foram previamente analisados em colaboração com a equipe do laboratório GeolnraUSP, com o trabalho *Análise espacial da influência da proximidade do canal no potencial de saturação superficial ao longo da ferrovia Carajás com aplicação do índice topográfico de umidade (TWI)* (Silva et al, 2025), apresentado no XV Simpósio Nacional de Geomorfologia – SINAGEO. Este interpreta a relação dos fatores da proximidade do rio Pindaré com o índice TWI em detalhe. Seguem adiante os principais resultados desta interpretação e análise estatística realizada em conjunto dos produtos gerados por mim.

AF	TF (km)	D	TWI		
			min	σ	max
1	373,8 - 376,4	20,37	20,64	19,51	3,29
2	381,4 - 381,8	73,65	10,26	16,04	3,08
3	387,4 - 389,5	17,05	22,61	19,99	2,98
4	391,2 - 391,7	45,92	20,52	16,15	2,63
5	395,1 - 395,7	29,29	24,99	15,91	3,29
6	399,8 - 400,5	32,38	21,90	16,05	2,54
7	402,0 - 402,5	74,46	6,16	13,99	2,58
8	402,7 - 404,3	14,29	22,77	22,13	3,72
9	404,7 - 405,4	11,36	40,05	21,79	2,95
10	405,5 - 408,4	10,06	24,02	21,78	3,86
11	411,2 - 411,9	26,06	19,61	19,02	4,15
12	412,0 - 413,2	22,13	22,32	19,00	3,13
13	413,8 - 414,0	64,40	25,00	14,68	2,07
Total	14,70 km	10,06	24,92	22,13	3,70

AF: Área da Ferrovia; TF: Trecho ferroviário; D: Distância da plataforma ao canal mais próximo; TWI: Topographic Wetness Index

Tabela 2: Relação entre a distância da plataforma da ferrovia ao rio e o *Topographic Wetness Index* – TWI para um trecho de 41 km de extensão da Estrada de Ferro-Carajás, dividida em 13 subseções (AF). Fonte: Silva et al, 2025.

A variável que representa a distância mínima da ferrovia ao rio (D min.) exibiu uma grande variabilidade ao longo do trecho analisado, com valores que variaram de 10,06 m a 64,40 metros (Tabela 2). Essa variação espacial demonstra que existem segmentos da ferrovia consideravelmente próximos aos corpos d'água, uma situação que pode ser influenciada por características locais da morfologia do terreno e pela configuração topográfica. A proximidade com os rios pode aumentar o risco de exposição da infraestrutura ferroviária a processos hídricos, como erosão lateral, alagamentos e instabilidade de taludes.

Os valores máximos do TWI superaram 20 em segmentos entre os quilômetros 402+700 e 408+400 (Tabela 2), indicando áreas com maior potencial de acumulação de umidade que são frequentemente associadas a vales, fundos de encostas ou zonas de convergência de fluxos superficiais. Esse comportamento está alinhado com a função do TWI, que combina informações sobre declividade e área de contribuição para estimar o potencial de saturação hídrica do solo. Por outro lado, os altos desvios padrão do TWI observados em alguns trechos (Figura 3b) indicam uma heterogeneidade nas condições de saturação do solo, sugerindo a presença de áreas com diferentes níveis de risco hidrológico e geotécnico ao longo do traçado ferroviário.

A Figura 22 revela uma forte correlação negativa ($r = -0,87$) entre a menor distância da ferrovia (Distância Mínima) e os valores máximos de TWI (TWI Máximo), o que indica que, quanto mais próxima a ferrovia está do rio, maior tende a ser a concentração de umidade nas áreas adjacentes. Observa-se também na figura a distribuição das seções ao longo dos eixos, com as seções 10, 9, 8 e 3 se destacando com TWI Máximo mais elevado e Distância Mínima menor que as demais seções. O maior TWI nas áreas próximas a rios foi um resultado esperado, devido ao fato destas áreas tenderem a apresentar menores declividades e maiores áreas de contribuição de drenagem, favorecendo a concentração de fluxo e o acúmulo de umidade na superfície

do solo. Esse padrão geomorfológico explica o aumento nos valores de TWI nas áreas mais próximas ao canal fluvial, sinalizando um maior potencial de saturação hídrica nessas zonas. Essa relação confirma que a proximidade ao rio favorece o acúmulo de umidade no terreno, o que pode comprometer a estabilidade geotécnica da ferrovia, especialmente em áreas de baixa declividade e solos com baixa permeabilidade.

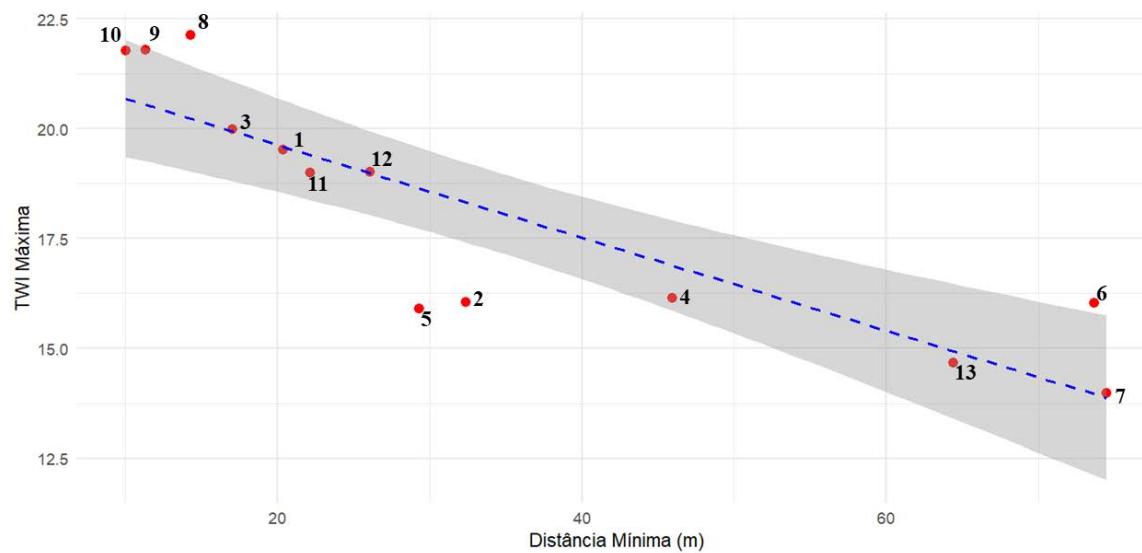


Figura 22: Distribuição do TWI máximo em relação a distância mínima no trecho estudado da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Fonte: Silva et al, 2025.

Em termos de classes, o TWI apresentou boa distribuição de contribuição total à área entre estas, porém em termos de contribuição à área dos deslizamentos os valores das três classes abaixo de 8,2 detêm 90% desta. Pode ser observada (Tabela 3) uma tendência de aumento de contribuição à área de deslizamentos conforme diminui o valor do índice, um resultado não esperado considerando o consenso do acúmulo de umidade/saturação elevada aumentar risco de instabilidade no solo.

Os trechos 3, 8, 9 e 10 foram os que apresentaram os maiores valores de TWI e menor distância do canal. Podem, portanto, ser consideradas áreas críticas, com alto potencial de saturação superficial do solo, contribuindo para a suscetibilidade à movimentos de massa. O trecho 10 (km 405+500 a 408+400), por exemplo, apresentou TWI de 21,78 a apenas 10 metros do canal (Tabela 2). Afim de destacar as seções identificadas como críticas, segue um mapa com quadros ampliados destas.

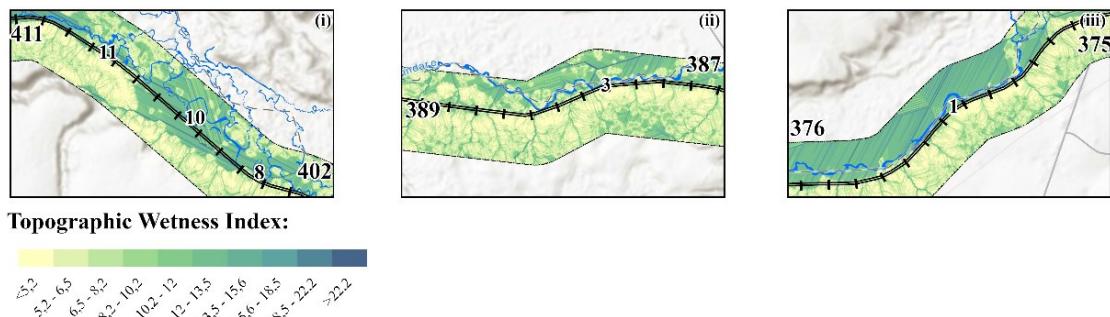


Figura 23: Seções da área de estudo de destaque com Topographic Wetness Index e trechos ferroviários. Os quadros ampliados (i, ii e iii) evidenciam áreas críticas com alto potencial de saturação superficial do solo e pequena distância ao canal, como os trechos 10, 3 e 1, onde os valores máximos de TWI ultrapassam 20. Fonte: Silva et al, 2025.

O Normalized Difference Wetness Index provou-se visualmente simplório, com apenas duas classes/cores dominantes, com raras exceções em área próxima ao Rio Pindaré ou em construções/queimadas e demais área impactadas fortemente pela ação antrópica. Contextualizado, porém, apresenta resultados estatísticos muito interessantes, que informam a compreensão da dinâmica da umidade na área. O índice NDWI pode variar de 1 a -1. Como pode ser observado na Figura 24, a faixa de valores entre 0,4 e -0,879 representou a totalidade da área estudada, porém a faixa entre 0 e -0,8 representa 98% desta. Os valores entre 0 a -0,4 significam que a superfície em questão tem baixo teor de água ou seca moderada. Valores acima de 0 indicam área com significativa saturação ou corpos hídricos.

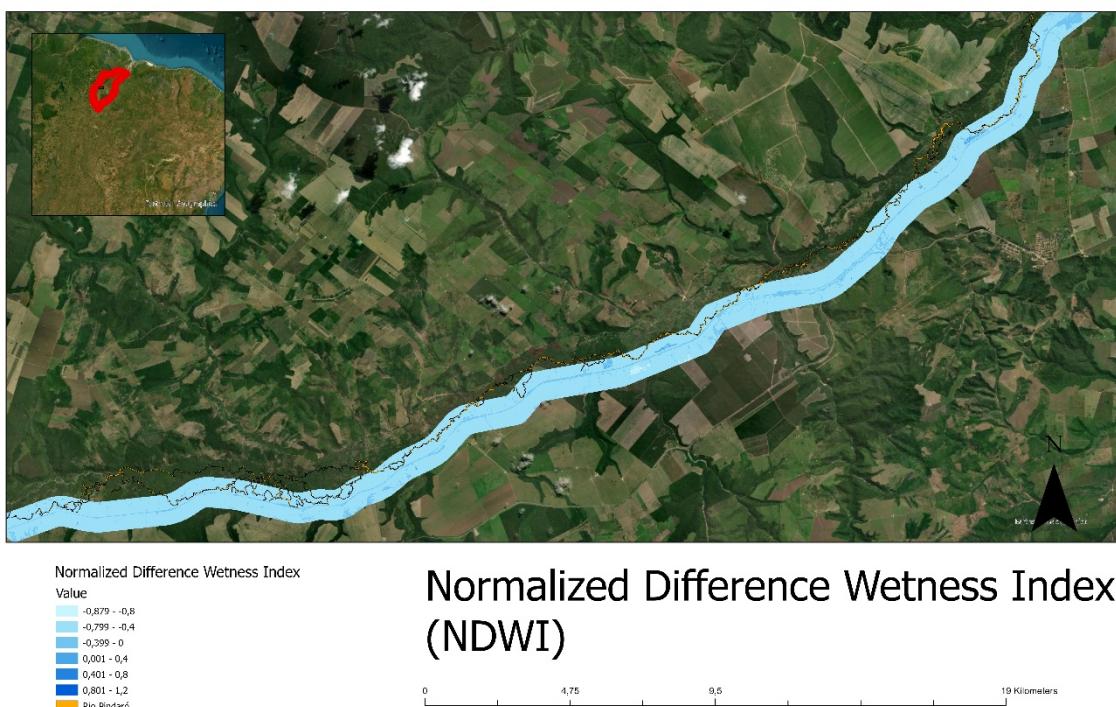


Figura 24: Normalized Difference Wetness Index ao longo de toda a seção/buffer. Fonte: elaborado pelo autor, mapa-base *World Imagery* da Esri (ESRI, 2025).

Na seção de foco, a classe de -0,4 a -0,8 consiste mais de 90% da área, caracterizando a maior parte do buffer de 500 metros ao redor da ferrovia como seco. Notavelmente, mesmo constituindo a dominante maioria da área total de estudo (90%), esta classe contribuiu apenas 54,5% da área onde ocorreram os deslizamentos. Em contraste, as áreas mais úmidas, que consistem apenas 9% da área total, contribuiram 45,5% da área dos deslizamentos (Tabela 3). Estes dados ajudam a validar a associação, dentro da bacia do Rio Pindaré, entre umidade, saturação do solo e elevado risco de haver falha estrutural deste, incitando movimentos de massa.

Factor	Classe	Contribuição à área total (%)	Contribuição à área de deslizamentos (%)
TWI	<5,2	17,91290631	45,94594595
	5,2-6,5	25,22946025	35,62653563
	6,5-8,2	16,29289947	11,54791155
	8,2-10,28	11,34807463	3,194103194
	10,28-12	9,535425871	2,702702703
	12-13,6	11,29014246	0,245700246
	13,6-15,6	5,859524956	0,491400491
	15,6-18,6	1,515659135	0
	18,6-22,2	0,825009946	0,245700246
	22,2-24,6	0,190896971	0
NDWI	<-0,8	0,268237031	0
	<-0,4	90,1773265	54,50049456
	<0	8,379822487	45,49950544
	<0,4	1,06476316	0
	<0,8	0,109276435	0
	>0,8	0,000574383	0

Tabela 3: Tabela dos fatores TWI e NDWI, apresentando a contribuição à área total e à área de deslizamentos de cada classe. Fonte: elaborado pelo autor.

A partir destes dados se torna mais fácil a visualização da concentração de deslizamentos em determinadas classes de cada fator. Como fica evidente nos seguintes gráficos, especialmente no caso do NDWI, não se trata de uma distribuição igual ou balanceada entre as classes. As implicações disso para o resultado do índice e a dinâmica hídrica da bacia já foram discutidas previamente.

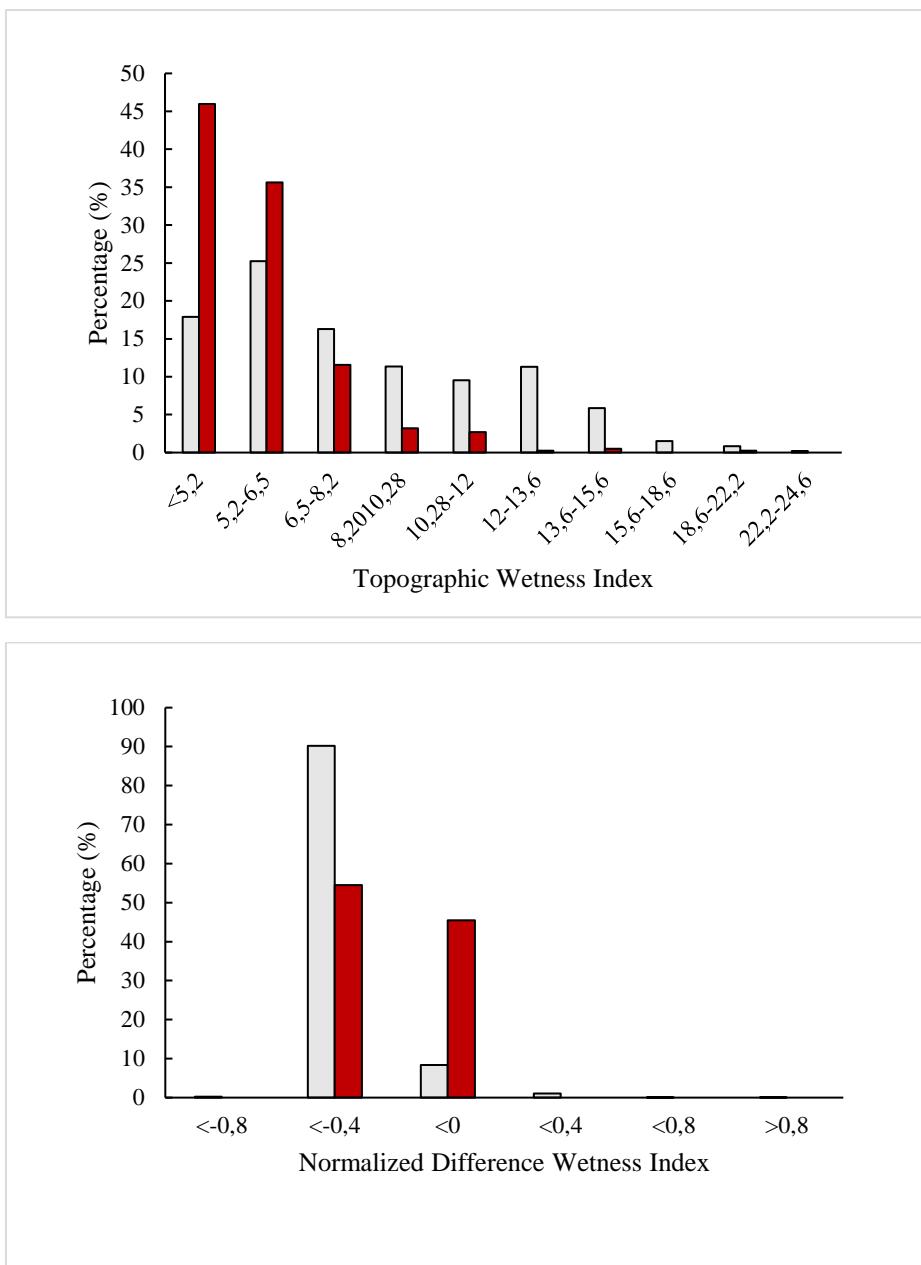


Figura 25 e 26: Gráficos de porcentagem de contribuição a área total e à área de deslizamentos para cada classe dos dois índices utilizados. Colunas brancas representam contribuição à área total e colunas vermelhas contribuição à área de deslizamentos. Fonte: elaborado pelo autor.

Conclusão

Os processos realizados contribuíram de diversas maneiras para a caracterização da dinâmica pluviométrica e hídrica da área de estudo, ajudando na compreensão de alguns dos principais fatores naturais responsáveis pelo desencadeamento de deslizamentos. A interpretação dos dados providos das estações pluviométricas superficiais permitiu, com base nos resultados da consistência dupla massa mensal, assumir uma relativa boa coerência de comportamento pluviométrico ao longo das áreas da bacia do Rio Pindaré cobertas pelas estações em questão. Por sua vez, a realização da interpolação da bacia pelos dados destas mesmas estações possibilitou um melhor entendimento da dinâmica da chuva no cenário, com uma tendência geral considerável à maior concentração chuvosa ao norte da área, alterada radicalmente (quase invertida) ao longo dos meses de outubro, novembro e dezembro. Contudo, esse comportamento não deve provar-se relevante à questão dos movimentos de massa na bacia, já que não há uma observável maior ocorrência de deslizamentos ao norte da área e, devido a generalizada muito menor quantidade de chuva nos período outubro-dezembro, a inversão da dinâmica não afeta muita significância.

As curvas de Intensidade-Duração-Frequência adicionaram certeza à determinação de uma coerência do comportamento pluviométrico ao longo das áreas cobertas e aonde ocorreram deslizamentos. Na análise dentro das primeiras duas horas de precipitação, porém, os pontos de deslizamentos apresentam sim diferenças de quantidade de precipitação significativas. A investigação de escalas temporais mais curtas, porém, cabe a futuras pesquisas com foco em eventos extremos/intensos ou com alta precipitação em curto tempo.

A integração do Topographic Wetness Index com a distância de cada ponto ao longo da área de estudo ao Rio Pindaré possibilitou uma correlação negativa forte entre os dois fatores, confirmando que a proximidade ao rio favorece o acúmulo de umidade no terreno e contribuindo para a identificação de seções ao longo da ferrovia onde está há maior vulnerabilidade à potencial saturação superficial do solo e, portanto, risco de instabilidade. A elaboração do Normalized Difference Topographic Index, por sua vez, caracterizou o solo da área como predominantemente superficialmente seco; por meio da interpretação da distribuição dos deslizamentos em relação às classes do índice, porém, as áreas com índice elevado e mais úmidas são confirmadas como de desproporcional relevância, detendo 45,5% da área dos deslizamentos com apenas 9% da área. Estas conclusões reforçam a associação entre umidade, topografia e estabilidade de encostas. Deve ser enfatizada, portanto, a necessidade de expandir a compreensão e o monitoramento contínuo destes fatores e das interações multifacetadas entre eles.

Referências Bibliográficas

ABRAHAM, Minu Treesa et al. IoT-based geotechnical monitoring of unstable slopes for landslide early warning in the Darjeeling Himalayas. *Sensors*, v. 20, n. 9, p. 2611, 2020.

ABREU, Beatriz Ventura. Estudos hidrológicos da bacia do Rio Pindaré-Mirim. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 12 mai. 2025.

ANTAL, Alexandru; GUERREIRO, Pedro MP; CHEVAL, Sorin. Comparison of spatial interpolation methods for estimating the precipitation distribution in Portugal. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 145, n. 3, p. 1193-1206, 2021.

BARATTO, Jakeline et al. Precipitation Anomalies and Trends Estimated via Satellite Rainfall Products in the Cananeia–Iguape Coastal System, Southeast Region of Brazil. *Climate*, v. 12, n. 2, p. 22, 2024.

BARATTO, Jakeline et al. Análise de agrupamento e tendências de mudanças em séries temporais pluviométricas na bacia hidrográfica do Alto Jacuí, Rio Grande do Sul. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 43, p. e191738-e191738, 2023.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Brasília: MIDR, 2023.

CHAVES, Fabiana Leão; GERSCOVICH, Denise Maria Soares; DE SALES, Luciano Salviano. Correlação chuva versus escorregamento-comunidade formiga/Rio de Janeiro. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 16, n. 1, p. 44-54, 2023.

Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1988.

DA SILVA, Aline Pimentel; BARROSO, Emílio Velloso; POLIVANOV, Helena. Índices pluviométricos críticos para prevenção de desastres por deslizamentos na cidade de Niterói, RJ. *Geologia USP. Série Científica*, v. 22, n. 3, p. 47-60, 2022.

DE OLIVEIRA, Nathalia Silva et al. Correlation between rainfall and landslides in Nova Friburgo, Rio de Janeiro—Brazil: a case study. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, p. 1-12, 2016.

D'ORSI, R. N. Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Órgãos da rodovia federal BR-116 RJ (Rio-Teresópolis). Coppe, Rio De Janeiro: Tese De Doutorado Em Ciencias E Engenharia Civil Na Universidade Federal Do Rio De Janeiro, p. 287, 2011.

ESRI. World Imagery: mapa-base. In: ArcGIS Pro, versão 3.x. Redlands: Esri, 2025.

FERNANDES A., Cecília. Estrada de Ferro Carajás: Informações Financeiras Intermediárias “Carve-out” e Relatório de revisão 30 de junho de 2021. Vale.com, 2021. Disponível em: <https://vale.com/documents/44618/2621367/DF+EFC+2T21.pdf/bb1f96bb-bf1f-e86a-ef76-a3ede99d1824?version=1.2&t=1671130739975>. Acesso em 20 mar. 2024.

FOURIE, A. B.; ROWE, D.; BLIGHT, G. E. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. *Geotechnique*, v. 49, n. 1, p. 1-13, 1999.

FROUDE, Melanie J.; PETLEY, David N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, n. 8, p. 2161-2181, 2018.

FUNK, Chris C. et al. A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. US Geological Survey, 2014.

GAM-IDF. Genetic Algorithm Methodology for IDF. Versão 1.0 (Beta). Pelotas: Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas / UFPel, 2020. Disponível em: <https://gphidro.shinyapps.io/gam-idf/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

GAO, B. C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GAO, Liang; ZHANG, Li Min; CHEUNG, R. W. M. Relationships between natural terrain landslide magnitudes and triggering rainfall based on a large landslide inventory in Hong Kong. *Landslides*, v. 15, p. 727-740, 2018.

GIANNECCHINI, ROBERTO. Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy). *Natural hazards and earth system sciences*, v. 6, n. 3, p. 357-364, 2006.

GOOSSENS, Chr; BERGER, ANDRÉ. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Geophys. J. (France)*, v. 4, n. 4, 1986.

GUASSELLI, L. A.; SIMIONI, J. P. D.; LAURENT, F. MAPEAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS ÚMIDAS USANDO TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX (TWI) A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO, NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ - RIO GRANDE DO SUL, BRASIL. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. I.], v. 21, n. 3, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i3.1714. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1714>. Acesso em: 29 abr. 2025.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Editora Blucher, 1976.

HO, Ken; LACASSE, Suzanne; PICARELLI, Luciano (Ed.). Slope safety preparedness for impact of climate change. CRC Press, 2017.

HONG, Yong et al. The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan. *Landslides*, v. 2, p. 97-105, 2005.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Ministério da Agricultura e Pecuária. 2024 Mapa de Estações. 1 mapa, color. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Catálogo de Imagens. São José dos Campos: INPE, 2025. Disponível em: <https://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore>, acesso em 22/04/2025.

LEE, Moung-Jin. Rainfall and landslide correlation analysis and prediction of future rainfall base on climate change. In: *Geohazards Caused by Human Activity*. IntechOpen, 2016.

LU, Ning; GODT, Jonathan W. Hillslope hydrology and stability. Cambridge University Press, 2013.

LY, Sarann; CHARLES, Catherine; DEGRE, Aurore. Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 7, p. 2259-2274, 2011.

MONTGOMERY, Carla W.; SZABLEWSKI, Gina Seegers. *Environmental geology*. New York: McGraw-Hill, 2006.

Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.68d2bb30. Acesso em 23-11-2024.

MONSIEURS, Elise; DEWITTE, Olivier; DEMOULIN, Alain. A susceptibility-based rainfall threshold approach for landslide occurrence. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 19, n. 4, p. 775-789, 2019.

PALIN, Erika J. et al. Implications of climate change for railway infrastructure. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 12, n. 5, p. e728, 2021.

PERUCCACCI, Silvia et al. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy. *Geomorphology*, v. 290, p. 39-57, 2017.

PLOUFFE, Cameron CF; ROBERTSON, Colin; CHANDRAPALA, Lalith. Comparing interpolation techniques for monthly rainfall mapping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: A case study of Sri Lanka. *Environmental Modelling & Software*, v. 67, p. 57-71, 2015.

RAHARDJO, H. et al. Shear-strength characteristics of a residual soil. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 32, n. 1, p. 60-77, 1995.

RAIMUNDO, Clebson do Carmo; SANSIGOLO, Clóvis Angeli; MOLION, Luiz Carlos Baldicero. Tendências das classes de precipitação na região metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, p. 397-408, 2014.

RIIHIMÄKI, H. et al. Topographic wetness index as a proxy for soil moisture: The importance of flow-routing algorithm and grid resolution. *Water Resources Research*, v. 57, n. 10, p. e2021WR029871, 2021.

ROBBINS, J. C. A probabilistic approach for assessing landslide-triggering event rainfall in Papua New Guinea, using TRMM satellite precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, v. 541, p. 296-309, 2016.

ROSI, Ascanio et al. Rainfall thresholds for rainfall-induced landslides in Slovenia. *Landslides*, v. 13, p. 1571-1577, 2016.

SALAH, Isabel Cristina et al. Soil Movements Correlation to Pluviometric Events in BR-101 Highway, in Santa Catarina, Brazil. In: *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. IOS Press, 2019. p. 1741-1748.

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

SILVA, F. P.; LEVIN, M. ; FISCINA, L. F. G. ; ALMEIDA, F. S. ; ZANOTTI, J. V. B. ; Vitelli, G ; FUTAI, M. M . Análise espacial da influência da proximidade do canal no potencial de saturação superficial ao longo da ferrovia Carajás com aplicação do índice topográfico de umidade (TWI). In: XV

SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2025, Natal - RN. Anais do XV SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA. Campina Grande, PB: Editora Realize, 2025. v. 1. p. 1-10.

SOARES, Fábio et al. Correlação entre movimentos de massa e pluviosidade nas encostas de João Pessoa/PB-Brasil. Geotecnia, n. 133, p. 51-62, 2015.

SÖRENSEN, Rasmus; ZINKO, Ursula; SEIBERT, Jan. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. Hydrology and Earth System Sciences, v. 10, n. 1, p. 101-112, 2006.

TABIOS III, Guillermo Q.; SALAS, Jose D. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 21, n. 3, p. 365-380, 1985.

TATIZANA, C. et al. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos—Serra do Mar, município de Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. 1987. p. 225-236.

TEEGAVARAPU, R. S. V.; CHANDRAMOULI, V. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. Journal of Hydrology, v. 312, p. 191–206, 2005. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.015.

WANG, Xia et al. Assessing Global Landslide Casualty Risk Under Moderate Climate Change Based on Multiple GCM Projections. International Journal of Disaster Risk Science, v. 14, n. 5, p. 751-767, 2023.

WANG, Zhaoli et al. Flood hazard risk assessment model based on random forest. Journal of Hydrology, v. 527, p. 1130-1141, 2015.

WIJEMANNAGE, A. L. K.; RANAGALAGE, Manjula; PERERA, E. N. C. Comparison of spatial interpolation methods for rainfall data over Sri Lanka. ACRS Proceedings, 2016.

WU, Ruian et al. Landslide susceptibility assessment in mountainous area: a case study of Sichuan–Tibet railway, China. Environmental Earth Sciences, v. 79, n. 6, p. 157, 2020.

YANG, Ruting; XING, Bing. A comparison of the performance of different interpolation methods in replicating rainfall magnitudes under different climatic conditions in chongqing province (China). Atmosphere, v. 12, n. 10, p. 1318, 2021.

ZARE CHAHOUKI, Mohammadali et al. Evaluation of co-kriging different methods for rainfall estimation in arid region (Central Kavir basin in Iran). Desert, v. 19, n. 1, p. 1-9, 2014.

ZIMMERMAN, J. L.; SHALLENBERGER, James P. GIS topographic wetness index (TWI) exercise steps [em linha]. out. 2016.