



Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E EVENTOS DE
TRANSBORDAMENTO DO RIO QUITANDINHA NO MUNICÍPIO DE
PETRÓPOLIS - RJ**

Giselle Petrunaro Torres

Orientador: Dr. Fabricio Polifke da Silva
Coorientador: M.Sc. Luiz Felipe Rodrigues do Carmo

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro
2022

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E EVENTOS DE
TRANSBORDAMENTO DO RIO QUITANDINHA NO MUNICÍPIO DE
PETRÓPOLIS - RJ

Giselle Petrunaro Torres

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Aprovada por:

Profº. Dr. Fabrício Polifke da Silva

M.Sc. Luiz Felipe Rodrigues do Carmo

Profª. Drª. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Profº. Dr. Wanderson Luiz Silva

M.Sc. Raquel Batista Medeiros da Fonseca

Rio de Janeiro

2022

Ficha Catalográfica

Torres, Giselle Petrunaro

“ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E EVENTOS DE
TRANSBORDAMENTO DO RIO QUITANDINHA NO MUNICÍPIO DE
PETRÓPOLIS - RJ”

Rio de Janeiro, 2022

41p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ.

1. Transbordamento. 2. Precipitação. 3. Rio Quitandinha. 4. Petrópolis.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro plano gostaria de agradecer a minha família por todo apoio, compreensão e companheirismo nesta trajetória. A dedicação de vocês foi fundamental em todo o processo e devo tudo a vocês, em especial aos meus pais César e Vera, meu irmão Geovane, meus avós Cléa e Carlos e meu namorado Jonathan. Vocês sempre foram meus melhores amigos.

Ao meu orientador e alicerce nesta faculdade, Luiz Felipe do Carmo, que fez com que eu pudesse acreditar em sonhos e em mim mesma.

Aos meus professores que acreditam nos alunos, inspiram e apoiam cada um de nós, em especial aos professores e orientadores Ana Cristina Palmeira e Fabrício Polifke que foram além dos limites da universidade.

Aos amigos que fiz neste curso que foram fundamentais nesse processo, em especial Douglas, Emille, Gabryele, Jonatha e Pamella.

Às minhas amigas do ensino médio que se tornaram uma família e permaneceram comigo em todos os momentos, dividindo todas as experiências. Em especial a Paula, que me orientou de diversas formas e da melhor maneira possível.

A toda equipe do Sistema Alerta Rio com que tive o prazer de trabalhar como técnica e aprender nos últimos anos. Cada um de vocês foi fundamental na minha formação e serei eternamente grata por tudo que levo de vocês.

Por fim, agradeço a Deus que sempre me manteve forte e nunca me deixou e sempre soube o que era melhor para mim quando eu mesma não entendia.

RESUMO

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO E EVENTOS DE TRANSBORDAMENTO DO RIO QUITANDINHA NO MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS - RJ

Chuvas intensas podem atuar como gatilho para a ocorrência de desastres socioambientais como por exemplo, inundações e deslizamentos, ocasionando inúmeras perdas econômicas e sociais. Neste contexto, iniciativas em pesquisa que visem entender melhor e quantificar as relações hidrometeorológicas locais podem auxiliar o conhecimento técnico e operacional, assim como, a geração de ferramentas de monitoramento e a elaboração de planos de contingência por parte de órgãos públicos. A cidade de Petrópolis, localizada no Estado do Rio de Janeiro, anualmente sofre com a ocorrência de chuvas que ocasionam eventos de transbordamentos dos rios que cruzam a região e, para os eventos em que são também observados altos acumulados pluviométricos, favorecem também em uma maior frequência eventos de deslizamentos. Neste trabalho, foram abordados casos de transbordamentos do rio Quitandinha, localizado na cidade de Petrópolis, em função da alta ocorrência de transbordamentos. Por conseguinte, este trabalho teve como objetivo quantificar o tempo de concentração para os casos de transbordamento do Rio Quitandinha, no município de Petrópolis – RJ. Utilizando dados de precipitação e nível de rio da estação Coronel Veiga do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) entre os anos de 2011 e 2021, onde foi aplicado o método gráfico e método indireto, dado com o uso de fórmulas matemáticas. O presente estudo também classificou os eventos em função do evento meteorológico que resultou nos eventos de transbordamento utilizados, fazendo assim uma análise estatística das ocorrências. Resultados mostram que a média e desvio padrão do tempo de concentração, isto é, o tempo em que após o início da precipitação o rio Quitandinha atingiu o seu nível máximo foram, respectivamente, 181 minutos (3 horas) e 42 minutos e que grande parte dos fenômenos estudados estavam associados a tempestades convectivas.

ABSTRACT

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN PRECIPITATION AND FLOOD EVENTS IN THE QUITANDINHA RIVER IN THE CITY OF PETRÓPOLIS - RJ

Intense rainfall can act as a trigger for the occurrence of socio-environmental disasters such as, for example, floods and landslides, causing numerous economic and social losses. In this context, research initiatives aimed at better understanding and quantifying local hydrometeorological relationships can help public organizations build technical and operational knowledge, generate monitoring tools and prepare contingency plans. The city of Petrópolis, located in the State of Rio de Janeiro, annually suffers from the occurrence of heavy rains that cause events of overflows of the rivers that cross the region and, for the events in which high accumulated rainfall is also observed, they also favor in a lower frequency of landslide events. In this work, cases of overflows of the Quitandinha river, located in the city of Petrópolis, were approached due to the high occurrence of overflows. Therefore, this work aimed to quantify the time of concentration for cases of the overflow of the Quitandinha river in the city of Petrópolis - RJ, using, for this purpose, precipitation and river level data from the Coronel Veiga station of the State Institute of the Environment (INEA) between the years 2011 and 2021, using the graphical method and the indirect method given using mathematical formulas. The present study also classified the events according to the meteorological event that resulted in the overflow events used, thus making a statistical analysis of the occurrences. Results show that the mean and standard deviation of the time of concentration, that is, the time in which, after the onset of precipitation, the Quitandinha river reached its maximum level, were, respectively, 181 minutes (3 hours) and 42 minutes and that a large part of the phenomena studied was associated with convective storms.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Meteorologia e contribuições.....	4
2.2. Tempo severo.....	5
2.3. Eventos extremos.....	6
2.4. Desastres Naturais.....	7
2.4.1. Transbordamentos.....	9
2.5. Relação com a Defesa Civil.....	10
3. DADOS E MÉTODOS.....	13
3.1. Dados pluviométricos e fluviométricos.....	13
3.2. Área de estudo.....	13
3.3. Metodologia Aplicada.....	16
3.4. Tempo de Concentração.....	16
3.4.1. Método direto.....	16
3.4.2. Método indireto.....	18
3.5. Categorização dos sistemas meteorológicos associados aos transbordamentos do rio Quitandinha.....	20
4. RESULTADOS.....	21
4.1. Dados históricos da estação Coronel Veiga.....	21
4.2. Eventos de transbordamento na estação Coronel Veiga.....	21
4.3. Comparação do tempo de concentração: método direto x método indireto.....	26
4.4. Classificação dos eventos meteorológicos.....	28
4.5. Relação do evento de transbordamento com os acumulados de chuva.....	31
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Representação da estratégia operacional proposta para a previsão de tempestades convectivas severas. Fonte: Nascimento 2005.....	04
Figura 02: Simbologia de inundações, enxurradas e alagamentos. Fonte: COBRADE (2012).....	09
Figura 03: Diagrama de Venn mostrando o impacto como interseção entre perigo, vulnerabilidade e exposição. Fonte: Adaptado de Schroeter (2021).....	11
Figura 04: Foto do rio Quitandinha na altura da rua Coronel Veiga.....	13
Figura 05: Representação do município de Petrópolis com destaque a área de contribuição do Rio Quitandinha.....	15
Figura 06: Características do hidrograma-tipo. Fonte: Lencastre e Franco (1992)...	18
Figura 07: Continuidade da série de dados de chuva e nível da estação Coronel Veiga.....	21
Figura 08: Gráficos gerados de precipitação e nível para os 27 eventos selecionados.....	23
Figura 09: Boxplot dos acumulados de chuva antecedentes de chuva para todos os eventos de transbordamento do rio Quitandinha.....	31
Figura 10: Distribuição dos eventos de transbordamento em relação aos acumulados de 1h, 2h, 3h, 6h, 12h e 24h com destaque para os casos de TC, FF e ZCAS classificados no percentil 70.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Adaptação da classificação dos desastres naturais definidos no COBRADE (2012).....	07
Tabela 02: Estatísticas de eventos de transbordamento.....	22
Tabela 03: Tempo de concentração estimado pelo método direto.....	25
Tabela 04: Tabela comparativa do tempo de concentração estimado pelo método direto e pelos métodos indiretos escolhidos.....	27
Tabela 05: Classificação do evento meteorológico relacionado ao evento de transbordamento.....	28
Tabela 06: Tabela do tempo de concentração médio do evento de transbordamento em relação ao evento meteorológico relacionado.....	30
Tabela 07: Estatísticas dos eventos classificados como Tempestade Convectiva (TC).....	33
Tabela 08: Estatísticas dos eventos classificados como Frente Fria (FF).....	33
Tabela 09: Estatísticas dos eventos classificados como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	34

1. Introdução

Nos últimos anos, não excluindo registros mais antigos, uma questão vem tomando espaço quando se pensa em regiões como a cidade de Petrópolis (RJ): os desastres socioambientais. As regiões serranas ou até mesmo os morros inseridos dentro de cidades grandes como o Rio de Janeiro são bastante suscetíveis a eventos extremos e muitas vezes são deflagrados por agentes naturais, como a chuva.

As questões ambientais estão intimamente ligadas às atividades humanas, uma relação que vem sendo cada vez mais expressiva. De acordo com Júnior e Botelho (2011), os recursos hídricos são os componentes ambientais que sofrem maior impacto, podendo este ser de forma direta através da utilização desordenada e indiscriminada e de forma indireta proveniente de outros meios como aqueles associados ao uso do solo.

A água caracteriza-se por ser o principal recurso natural condicionante da ocupação humana de uma determinada região (LOU, 2010). Tratando-se de eventos como inundações, por exemplo, historicamente sabe-se que a sociedade se instalou ao redor de rios e se desenvolveu nestas regiões. Segundo Goerl *et al.* (2017), o crescimento populacional está muito ligado ao maior número de ocorrências de desastres naturais, denominados neste caso pelos autores como desastres hidrológicos.

Em função de diversas ocorrências nos últimos anos, como a grande tragédia da região serrana de 2011, diversos trabalhos foram realizados sobre a região, sendo realizados por diferentes óticas e áreas de estudo. Para entender melhor eventos como esses e outros mais que ocorreram, é imprescindível que se tenha uma interdisciplinaridade, visto que ocorrências como transbordamentos envolvem questões hidrológicas, atmosféricas, geológicas, biológicas e também questões sociais.

É de grande relevância entender os fenômenos meteorológicos relacionados a eventos extremos, seja em eventos de transbordamento ou outros como deslizamentos de terra, visto que em muitos desastres o mecanismo desencadeador

é a precipitação. Desta forma, conhecer melhor as características da precipitação pode ser substancial na prevenção e mitigação de desastres naturais.

Modelos hidrológicos vem sendo tradicionalmente utilizados para mapear as áreas suscetíveis a eventos de transbordamento/cheias/inundações, onde se faz necessário para a realização deste mapeamento que se tenham dados hidrológicos e topográficos (Goerl *et. al.*, 2017). Contudo, estudar as ocorrências deste tipo de evento em determinada região pode ser importante para compreender os mecanismos e futuramente aplicar este conhecimento na modelagem hidrológica.

A cidade de Petrópolis - RJ, importante no contexto histórico de nosso país e foco deste estudo, é um dos municípios do Brasil mais afetados por desastres como deslizamentos e inundações, por exemplo. Por conta da sua relevância, susceptibilidade e complexidade de entendimento - dada em grande parte por características da topografia e hidrografia local -, e histórico de ocorrência de eventos extremos, que acarreta diversas consequências e prejuízos na região, esta será objeto de estudo deste trabalho.

De modo mais claro, em relação a eventos extremos, esse tipo de desastre pode acarretar diversos danos à população (tanto financeiros, como sociais), levando até a perda de vidas. Por conta disso, o estudo desses fenômenos é o principal fator motivador deste trabalho, de modo a tentar melhorar o entendimento dos mesmos e, também, futuramente, servir como ferramenta de auxílio nas tomadas de decisão dos órgãos públicos responsáveis.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo principal estudar a relação entre a ocorrência de precipitação e os eventos de transbordamento de um importante rio na cidade de Petrópolis - RJ, o Rio Quitandinha.

Dentre os objetivos específicos, encontram-se:

- i) Identificar os eventos de transbordamento no rio Quitandinha no ponto estudado;
- ii) Analisar estatisticamente de forma descritiva os eventos de transbordamento;

- iii) Calcular os tempos de concentração para os eventos de transbordamentos e analisar estatisticamente de forma explicativa;
- iv) Classificar os fenômenos meteorológicos atuantes em cada um dos eventos;
- v) Avaliar a variabilidade dos valores encontrados de tempos de concentração considerando a ocorrência de diferentes sistemas meteorológicos.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma breve revisão da importância da meteorologia em eventos de chuvas intensas, a sua relação com desastres socioambientais e como esta área pode contribuir com a população, principalmente com a parcela mais vulnerável.

2.1. Meteorologia e contribuições

A Meteorologia pode ter contribuição em diversos setores. Um dos mais importantes setores, que tem grande destaque, é a meteorologia operacional que trabalha com previsão e monitoramento. A previsão do tempo pode ser dividida em previsão de longo, médio, curto e curtíssimo prazo, onde a proximidade do evento torna maior a acurácia do mesmo. Contudo, como a atmosfera é dinâmica, altamente não linear e muito influenciada por fatores termodinâmicos e orográficos, por exemplo, o monitoramento da atmosfera se torna indispensável.

Nascimento (2005) propôs uma estratégia operacional para a previsão do tempo (Figura 1), onde no primeiro nível é feita uma previsão de médio prazo (poucos dias de antecedência), no segundo nível é feita uma previsão de curto prazo (um dia a algumas horas antes do evento) e por fim, no terceiro nível é feita uma previsão de curtíssimo prazo, conhecida como *nowcasting* (poucas horas antes até a ocorrência do evento).

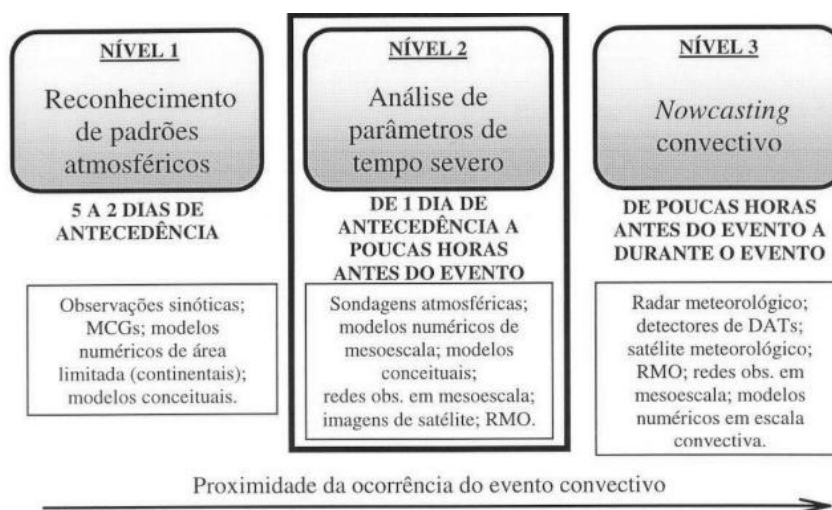


Figura 1: Representação da estratégia operacional proposta para a previsão de tempestades convectivas severas. Fonte: Nascimento 2005.

No esquema visto na Figura 1 acima o autor pontua as estratégias de previsão do tempo adotadas e as ferramentas recomendadas para tal. Os meteorologistas previsores ao conhecer a localidade e os instrumentos disponíveis são capazes de contribuir ativamente na prevenção de desastres socioambientais, emitindo boletins meteorológicos diários, avisos ao detectar condições favoráveis à ocorrência de um evento de tempo severo e alertas na iminência do evento para que a população procure a melhor forma de se proteger contando com o apoio das autoridades.

2.2. Tempo Severo

Os fenômenos de tempo severo, responsáveis por grande parte dos desastres citados, são tratados por Nascimento (2005) por duas abordagens: um conceito explícito de que tratam-se de tempestades capazes de gerar fenômenos com significativo impacto social e econômico e um conceito implícito de que são tempestades com correntes ascendentes e descendentes extremamente intensas e portanto capazes de gerar granizos e rajadas de vento destrutivas . O autor pontua também que alguns eventos de tempo severo como vendavais, granizos e tornados ainda que relativamente raros em relação a outros fenômenos, precisam receber devida atenção uma vez que sua ocorrência representa potencial ameaça a atividades importantes como defesa civil, agricultura e energia.

Essas duas definições de tempo severo podem ser conflitantes em alguns pontos, visto que nem sempre há ocorrência de tempestades com fortes correntes verticais para que se tenha um fenômeno de inundação, por exemplo. Nascimento (2005) pontua que dentro do contexto brasileiro, essa é uma questão discutível; cabe aos profissionais envolvidos determinar os eventos que se classificam como severos.

Os fenômenos de tempo severo são previstos pelo meteorologista através de modelos numéricos de mesoescala, com a utilização de índices de instabilidade atmosféricos definidos. Ao pensar na evolução dos sistemas convectivos, responsáveis em geral pelos fenômenos de tempo severo, a previsão desses eventos seria a primeira fase do monitoramento, onde ainda há uma maior incerteza da intensidade, local e horário do evento. Em seguida, com a formação das células convectivas já é possível ter maior precisão do impacto do evento ao utilizar dados

de sensoriamento remoto e dados observados se disponíveis. A partir deste ponto, o monitoramento por parte do meteorologista, aliado a seu conhecimento técnico e experiência, possibilita estabelecer uma tendência de desenvolvimento das células convectivas.

A previsão de chuvas fortes, especialmente quando produzidas por tempestades convectivas, ainda representa um tópico a ser mais bem explorado com o emprego de modelos numéricos, pois exige simulações físicas e matemáticas adequadas e associadas a uma ampla variedade de processos em diferentes escalas espaço-temporais e suas complexas interações (Silva, 2019).

Muitos modelos e parâmetros utilizados na previsão de tempo severo no Brasil foram desenvolvidos a partir de condições e dados de outros locais, como a América do Norte, por exemplo. Uma pergunta que surge é se os parâmetros convectivos utilizados se adaptam tão bem para a previsão operacional de tempo severo na América do Sul quanto se adaptam para a América do Norte (NASCIMENTO, 2005). Desta forma, cabe ao profissional avaliar as condições do local e as variáveis para obter a previsão mais acurada possível.

2.3. Eventos extremos

De acordo com o quinto relatório do IPCC (AR6), publicado em 2021, um evento meteorológico extremo é definido como um evento raro em determinado local e época do ano. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) classifica estes eventos extremos como ocorrência de condições meteorológicas ou climáticas severas que causam impactos devastadores nas comunidades, agricultura e nos ecossistemas naturais. Desta forma, os eventos extremos estão geralmente relacionados a eventos de menor duração e que incluem casos de ondas de calor, chuvas intensas, geadas, tornados, ciclones e inundações.

Nos últimos anos, muito se tem visto a respeito da ocorrência destes eventos extremos, onde diversas cidades brasileiras têm sido afetadas, causando múltiplos e constantes impactos como muitas mortes, feridos e desabrigados, proliferação de doenças, perdas econômicas, impactos ambientais, entre outros. (SENA *et al.*, 2017).

O conceito de evento extremo está intimamente ligado ao conceito de desastres socioambientais, onde em grande parte das vezes o evento extremo acarreta o mesmo. Contudo, os desastres podem ser desencadeados por eventos severos, que se distinguem de eventos extremos; um evento severo pode ser classificado como aquele em que há potencial de danos humanos, sociais e econômicos e já um evento extremo é aquele onde as condições apresentadas são raras, como visto no tópico anterior. Um evento severo pode acontecer com maior frequência e depende muito das características do evento em função do local atingido, como é o caso da Região Serrana do RJ que com recorrência é atingida por eventos severos de chuva. Em muitos casos, um evento extremo e/ou severo acarreta mais de um tipo de ocorrência, como observado em alguns eventos que ocorreram na região serrana do estado do RJ, por exemplo.

2.4. Desastres Naturais

O termo desastre está relacionado com eventos com capacidade de provocar danos em diversas categorias. O COBRADE (Classificação e Codificação Brasileira de Desastres), veiculado pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (Sedec), classifica os desastres em naturais e tecnológicos. Em relação aos desastres naturais, há uma divisão em geológico, hidrológico, meteorológico, climatológico e biológico (Tabela 1).

Tabela 1: Adaptação da classificação dos desastres naturais definidos no COBRADE (2012)

Desastres naturais	
Geológico	Terremoto
	Emanação Vulcânica
	Movimento de Massa
	Erosão

Hidrológico	Inundações
	Enxurradas
	Alagamentos
Meteorológico	Sistemas de grande escala/escala regional
	Tempestades
	Temperaturas extremas
Climatológico	Secas
Biológico	Epidemias
	Infestações/pragas

Em muitos casos, como aconteceu em eventos de grande repercussão, um determinado desastre ambiental pode desencadear simultaneamente outro. Por exemplo, um evento meteorológico como uma tempestade pode levar a um evento hidrológico como inundação e alagamento ou também pode levar a um evento geológico como movimento de massa.

No evento ocorrido em janeiro de 2011 na Região Serrana, fortes chuvas foram responsáveis por alagamentos e movimentos de massa em diferentes municípios, sendo considerada por muitos a maior tragédia natural do país. De acordo com dados do Banco Mundial, a tragédia deixou mais de 900 mortes em diferentes cidades na região e afetou mais de 300 mil pessoas.

Tendo este trabalho como foco avaliar os eventos de transbordamentos do rio Quitandinha a seguir será apresentada uma breve seção sobre este tema e as pesquisas atualmente desenvolvidas.

2.4.1. Transbordamentos

De acordo com o COBRADE (2012), os eventos hidrológicos que são divididos em inundações, enxurradas e alagamentos possuem distinções e simbologias, assim como as demais subcategorias dos desastres (Tabela 1). Inundações são definidas como submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas; as enxurradas são definidas como o escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas e os alagamentos são definidos como a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas (Figura 2).



Figura 2: Simbologia de inundações (esq.), enxurradas (centro) e alagamentos (dir.)

Fonte: COBRADE (2012)

Os eventos de inundações ou transbordamentos de um canal estão normalmente associados a altos acumulados pluviométricos, à distribuição de precipitação na drenagem, à velocidade em que a água leva para atingir o solo e a velocidade do escoamento da superfície. (ALVES, 2021). Com isso, podemos designar os eventos de transbordamento como eventos de cheia ou inundação. Contudo, de acordo com Ramos (2013) embora estas palavras sejam amplamente utilizadas como sinônimos, não são; a autora afirma também que todos os eventos de cheias provocam inundações mas nem todos os eventos de inundações se devem a eventos de cheia; onde as cheias podem ser caracterizadas como fenômenos hidrológicos temporários e as inundações - que mesmo sendo em sua maioria temporárias - podem ser até mesmo definitivas.

O transbordamento de um rio, como foco do presente trabalho, se refere ao volume excedente de água em um canal e que por sua vez é causador do transbordo do curso de água e que atinge a região adjacente, resultando em um episódio de inundação.

Um conceito largamente utilizado é o de *flash floods*, que em tradução livre significa inundações bruscas ou repentinas. Este evento, segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), está entre os desastres naturais mais mortais do mundo e apresenta aproximadamente 85% dos casos de inundações. Ainda de acordo com a OMM, eventos deste tipo ocorrem em todo o mundo e podem variar seu tempo de desenvolvimento de minutos a várias horas, dependendo da superfície e das características geomorfológicas e hidrológicas da região.

O Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) classifica as inundações em dois tipos: as inundações repentinas ("*flash floods*") e as inundações fluviais mais generalizadas, onde a primeira é responsável por perda de vidas - como visto no parágrafo anterior - e a segunda é geralmente responsável por perdas e danos de propriedade.

2.5. Relação com a Defesa Civil

A relação entre a Meteorologia e a prevenção dos eventos extremos é muito estreita e neste vínculo, o papel da defesa civil se faz essencial. A defesa civil, seja no âmbito nacional, estadual ou municipal, é uma das mais importantes ligações entre a meteorologia e a população.

O papel do meteorologista operacional vai além de emitir previsões e boletins meteorológicos, pois a emissão de avisos e alertas para os tomadores de decisão e para a população é necessária. Segundo Almeida (2018) as causas e consequências assim como as respostas e ações para prevenção e mitigação vem se tornando temas de grande interesse; esse interesse vem crescendo por parte da comunidade científica e também por parte da população que é comumente afetada por eventos severos e/ou extremos.

Ainda de acordo com Almeida (2018) conhecer os riscos, as peculiaridades da região e a gestão da defesa civil, possibilita priorizar a adoção de políticas públicas e modelos eficazes voltados para a prevenção, minimizando os impactos

dos desastres sobre a população. Desta forma, é preciso que se tenha maior vínculo entre as políticas, o uso de avisos e alertas e ferramentas de redução de riscos para que as ações sejam constantes, ou seja, é preciso que seja feito um trabalho de prevenção além do trabalho de gerenciamento de eventual crise. Na Figura 3 é apresentado um esquema onde mostra que o impacto é produto da vulnerabilidade, exposição e perigo.



Figura 3: Diagrama de Venn mostrando o impacto como interseção entre perigo, vulnerabilidade e exposição. Fonte: Adaptado de Schroeter (2021).

Nestes dois processos o papel do meteorologista se faz presente, uma vez que o trabalho do profissional seja feito diretamente para o uso da população. O trabalho do meteorologista operacional encontra diversas dificuldades, que vão da falta de dados e equipamentos a problemas logísticos e de operação. Contudo, utilizando as ferramentas disponíveis, o profissional aliado a outros profissionais de áreas afins - como geólogos, geógrafos, hidrólogos e engenheiros, por exemplo - é possível realizar um trabalho que faz diferença na vida da população, principalmente daqueles mais vulneráveis.

Um ponto de grande importância ao buscar entender os eventos extremos que ocorreram ou ocorrem com frequência em determinado local é conhecer as características do local, uma vez que conhecendo os agentes e os fatores de relevância, as melhores providências podem ser tomadas. No desenvolvimento de

planos de ação e contingência, a interdisciplinaridade se faz presente uma vez que diversos fatores, que por sua vez cabem à diferentes áreas, influenciam a ocorrência de um desastre, sua prevenção e mitigação.

3. Dados e métodos

Neste capítulo são descritos os dados utilizados, a área de estudo e a metodologia aplicada neste estudo.

3.1. Dados pluviométricos e fluviométricos

Para a identificação dos eventos de transbordamento que ocorreram no rio Quitandinha, localizado no Município de Petrópolis - RJ foram utilizados dados obtidos da estação Coronel Veiga (Latitude: - 022,5263 e Longitude: -043,1938) do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) do estado do Rio de Janeiro do período compreendido entre 26/10/2011 e 31/12/2021, com dados coletados pluviométricos (em milímetros) e fluviométricos (em metros) coletados a cada 15 minutos (Figura 4)



Figura 4: Foto do rio Quitandinha na altura da rua Coronel Veiga.

3.2. Área de estudo

A cidade de Petrópolis no Estado do Rio de Janeiro (Figura 5), conhecida também como Cidade Imperial, faz parte da Microrregião Serrana do estado,, com população estimada em 2021 de mais de 307 mil pessoas de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Ainda de acordo com o IBGE, a cidade de Petrópolis tem área de unidade territorial de cerca de 791 km² e tem como bioma predominante a Mata Atlântica.

A região onde se encontra Petrópolis, a Serra da Estrela, foi por muitos anos desconhecida pelos portugueses colonizadores, à exceção de alguns grupos de expedição, muito em função da dificuldade de acesso à região montanhosa em que se encontra. A região começou a receber atividade econômica quando riquezas foram descobertas no estado de Minas Gerais e foi aberto o conhecido “Caminho Novo” que passava pela Serra da Estrela como forma de encurtar o caminho. O Imperador D. Pedro I encantou-se pela região e adquiriu uma fazenda com o objetivo de construir um palácio de verão, visto que o clima da região agradava ao imperador e a seus visitantes. Após a abdicação e morte do imperador, seu filho D. Pedro II herdou terras adquiridas em Petrópolis e a pouco antes da metade do século XIX começou o projeto de povoamento da região; Petrópolis veio a nascer em 1845, sendo em 1857 elevada a município e cidade (INSTITUTO MUNICIPAL DE CULTURA DE PETRÓPOLIS).

Uma parceria do IBGE e do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais) teve como objetivo associar informações do censo demográfico do ano de 2010 com as áreas de risco monitoradas pelo CEMADEN e assim estimar a população em áreas de risco em 872 municípios monitorados pelo CEMADEN em todo o Brasil. Desta forma, o produto estimou que o município de Petrópolis possui cerca de 72 mil pessoas expostas em áreas de risco de inundações, enxurradas e movimentos de massa.

A área de estudo desta pesquisa é o Rio Quitandinha, um dos principais rios e uma das principais áreas com risco de inundação no município de Petrópolis, pertence à região hidrográfica do Piabanha (RH IV), de acordo com a Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos nº 107 de 22 de maio de 2013 (INEA). O rio Quitandinha encontra-se dentro da área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Piabanha, localizada na região montanhosa do estado do Rio de Janeiro, no reverso da Serra do Mar, abrangendo o município de Petrópolis. Na Figura 5, é possível observar a localização da bacia do rio Quitandinha.

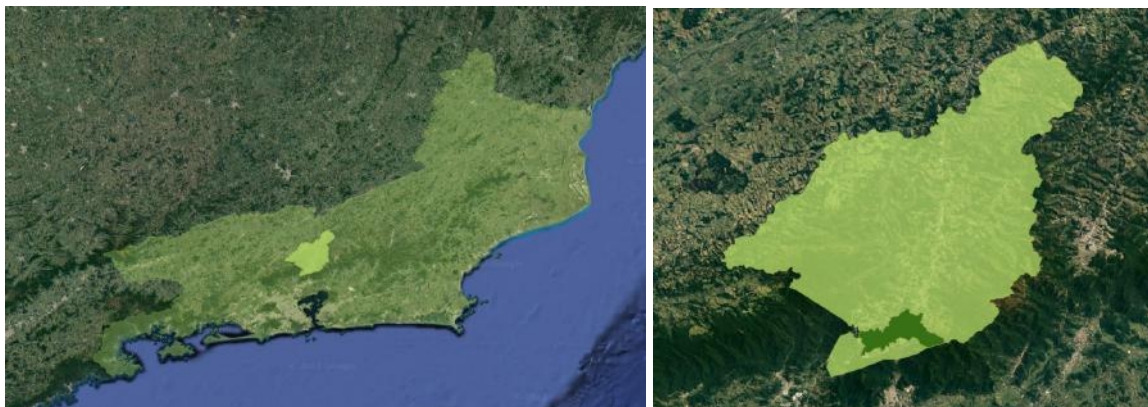


Figura 5: Localização do município de Petrópolis no estado do Rio de Janeiro (dir.) e representação do município de Petrópolis com destaque a área de contribuição do Rio Quitandinha (esq.). Fonte: Elaboração Própria.

De acordo com Carvalho *et al.* (2013), a bacia do rio Quitandinha evidencia topografia acidentada com as partes mais altas da bacia dotadas de grande declividade e ocupadas, sobretudo por afloramentos rochosos, favorecendo um maior escoamento superficial da água. Em sua porção próxima de jusante do rio Quitandinha as áreas de captação de escoamento são maiores, o que sugere que nesses locais o fluxo d'água perde energia pelos baixos valores de declividade presentes e acumula-se favorecendo a ocorrência de cheias (Carvalho *et al.*, 2013).

De acordo com Pelech e Peixoto (2022), os terrenos da bacia hidrográfica do Quitandinha se encontram acima de 800 m de altitude, possuindo trechos com altitude superior a 1500 m na porção mais ao leste. Os autores pontuam também que a expansão da área urbana se dá principalmente pelos fundos dos vales fluviais e terrenos de menor elevação, onde se encontram cotas altimétricas de 800m a 900m. O Rio Quitandinha atravessa uma área bastante urbanizada em seu percurso até o centro da cidade de Petrópolis. Este rio se desenvolve ao longo da Rua Coronel Veiga - uma das principais vias do município - e que possui seção de escoamento reduzida em alguns trechos e apresenta também inúmeras travessias de rua, que em alguns casos estreitam ainda mais o canal (GONZALES, 2014).

3.3. Metodologia aplicada

A partir dos dados obtidos da estação Coronel Veiga, foi feito o tratamento dos dados com o objetivo de identificar os dados inconsistentes e os dados faltantes

na série histórica. Este tratamento de dados foi feito usando a ferramenta *Google Colab*, que utiliza a mesma linguagem de programação e as mesmas bibliotecas da ferramenta computacional *Python*.

Os dados foram obtidos junto ao INEA em formato *.xlsx* e foram tratados diretamente no *Google Colab*. A primeira etapa foi identificar os dados inconsistentes na série e removê-los para que não abrigassem dados espúrios que pudessem comprometer o resultado da pesquisa. A partir disso, foi possível também identificar os dados faltantes na série.

O passo seguinte foi determinar os eventos de transbordamento na série, filtrando os valores de nível maior ou igual a cota de transbordamento de 2,30 m determinada pelo INEA, onde foi considerado como evento o valor máximo de nível em leituras contínuas.

Neste trabalho, foram registrados 92 casos de transbordamento no período selecionado (2011 - 2021), onde em cada evento foi selecionado o valor máximo do nível e a partir disso foram escolhidos os valores referentes ao percentil 70 para uma análise mais detalhada, resultando em 27 casos. De acordo com Moraes (2005), considera-se que a dimensão mínima de uma amostra deve ser de 30 unidades porém este tamanho depende de fatores como o grau de confiança que se deseja obter, o grau de pormenor desejado na análise e os recursos e tempos disponíveis. Para o presente trabalho, foi escolhido o percentil 70 para uma análise estatística mais confiável com o objetivo de obter uma amostra próxima de 30 casos.

3.4. Tempo de Concentração

3.4.1. Método direto

Um conceito muito aplicado em hidrologia quando se refere a eventos de transbordamentos é o conceito de tempo de concentração (t_c), que foi definido por Tucci (1993) como o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia, deslocar-se até a seção principal.

Diversos autores definiram o conceito de tempo de concentração assim como estabeleceram diferentes critérios para determinação do tempo de concentração de determinada bacia de acordo com as características da mesma, utilizando métodos gráficos e equações matemáticas. O hidrograma - gráfico que relaciona a vazão no tempo (TUCCI, 1993) - tem seu comportamento influenciado pela forma da bacia e assim como o tempo de concentração, é diretamente influenciado por fatores como a declividade da bacia.

O tempo de concentração é um parâmetro hidrológico de grande importância para a reprodução do hidrograma da seção de um rio, onde informa o momento de ocorrência da vazão máxima e a forma do hidrograma (JÚNIOR e BOTELHO, 2011). Em função da forte relação entre o tempo de concentração e as características locais da bacia, autores como Lencastre e Franco (1992) consideram o tempo de concentração uma característica constante da bacia, não sendo diretamente influenciado pelo caráter da chuva. No entanto, muitos trabalhos são desenvolvidos buscando entender melhor esta variável e com isso, são encontrados diferentes resultados na literatura, onde cada autor pontua as especificidades de sua abordagem e local de estudo.

Utilizando o método proposto por Lencastre e Franco (1992), como mostrado na Figura 6, foi determinado o tempo de concentração, conhecido neste caso como método direto. Para os casos citados referentes ao percentil 70, foi determinado o tempo de concentração utilizando os registros referentes ao nível do Rio Quitandinha com base na estação hidrometeorológica Coronel Veiga (INEA). Para melhor visualizar a relação entre a precipitação e o nível do Rio, nos gráficos gerados usando a ferramenta *Google Colab*, foram incluídos os registros de chuva assim como os de nível, em intervalos de 15 minutos.

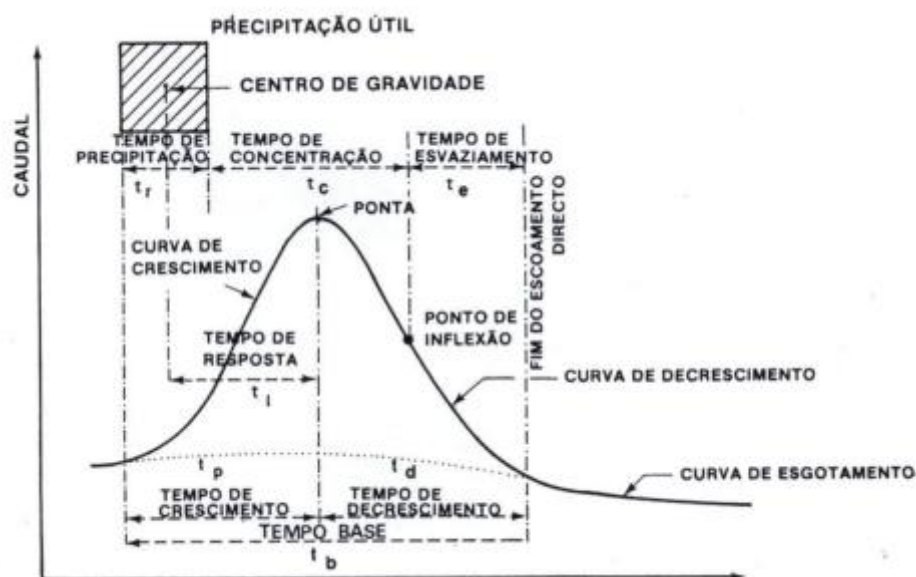


Figura 6: Parâmetros Hidrometeorológicos. Fonte: Lencastre e Franco (1992)

3.4.2. Método indireto

O passo seguinte, para fins de comparação, foi determinar o tempo de concentração pelo método indireto que, de acordo com Júnior e Botelho (2011), é baseado em informações secundárias como algumas formulações matemáticas previamente estabelecidas para uma região, que podem ser parâmetros hidrometeorológicos ou fisiográficos.

Mata-Lima *et al.* (2007) classificaram os métodos de cálculo de tempo de concentração de maneira indireta em métodos estritamente empíricos e métodos semi-empíricos. O método estritamente empírico é aquele baseado no estabelecimento de uma relação entre o tempo de concentração e as características fisiográficas da bacia, sendo um método mais rígido e estático em relação a mudanças na bacia estudada; já o método semi-empírico aquele que considera a variação dos parâmetros da bacia em relação a ocupação da mesma.

No trabalho de Mata-Lima *et al.* (2007) foram descritas algumas equações tanto do método estritamente empírico como do método semi-empírico. Para o presente trabalho, foram escolhidas algumas equações do método estritamente empírico, onde se apresenta menor flexibilidade dos parâmetros para o cálculo do tempo de

concentração. As equações foram escolhidas por estarem fundamentadas nos mesmos parâmetros, que são:

- Área da Bacia (km²): A
- Declividade média da linha de água principal da bacia (m/m): I
- Comprimento da linha de água principal da bacia (km): L

As equações escolhidas do método estritamente empírico para determinar o tempo de concentração (t_c [h]), de acordo com Mata-Lima (2007) foram dos seguintes métodos¹:

- Temez:

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L}{I^{0,25}} \right)^{0,76}$$

- Pasini:

$$t_c = \frac{0,108(AL)^{1/3}}{I^{0,5}}$$

- Picking:

$$t_c = 0,088333 \left(\frac{L^2}{I} \right)^{0,333}$$

- Ven Te Chow:¹

$$t_c = 0,8773 \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,64}$$

Para obtenção dos dados de área da bacia, comprimento e declividade média da linha da água foram utilizados dados obtidos no banco de dados da ANA em

¹ Todas as equações citadas estavam nas mesmas unidades descritas nos parâmetros, exceto a declividade da linha da água no método Ven Te Chow, sendo neste caso I [m/km]. Esta conversão foi considerada no momento do cálculo do tempo de concentração

conjunto com dados de SRTM Alos Palsar, onde os dados foram tratados no ArcGis e os valores foram obtidos utilizando fórmulas matemáticas.

3.5. Categorização dos sistemas meteorológicos associados aos transbordamentos do rio Quitandinha

A última etapa do trabalho foi baseada na categorização dos sistemas meteorológicos que favoreceram os transbordamentos do rio Quitandinha entre 2011 e 2021. Para isso, foram utilizadas imagens de satélite do acervo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) nos canais infravermelho e visível, cartas sinóticas da Marinha do Brasil e do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

Após a categorização dos sistemas meteorológicos, buscou-se realizar análise estatísticas explicativas relacionando os acumulados de chuva para cada evento considerado o nível máximo do nível do rio atingindo no transbordamento considerando os acumulados pluviométricos antecedentes para os intervalos de 1h, 2h, 3h, 6h, 12h e 24h.

4. Resultados

4.1. Dados históricos da estação Coronel Veiga

Para a presente pesquisa foram utilizados dados de chuva (mm) e nível (m) do Rio Quitandinha utilizando como referência a estação Coronel Veiga do INEA, como pontuado no capítulo anterior.

Os dados disponíveis da estação para esta pesquisa compreendem o período de 26 de outubro de 2011 até o final do ano de 2021. Desta forma, foi escolhido para este trabalho o intervalo de 2011 - a partir da data disponível anteriormente citada - a 2021. Contudo neste período, alguns intervalos apresentaram dados indisponíveis, além de outros dados espúrios que foram desconsiderados neste trabalho. Desta forma, utilizando o *software Google Colab*, a Figura 7 aponta os dados faltantes na série histórica, que constituem cerca de 24% da série histórica. Na figura 7 é possível observar a ausência dos dados no ano de 2015.

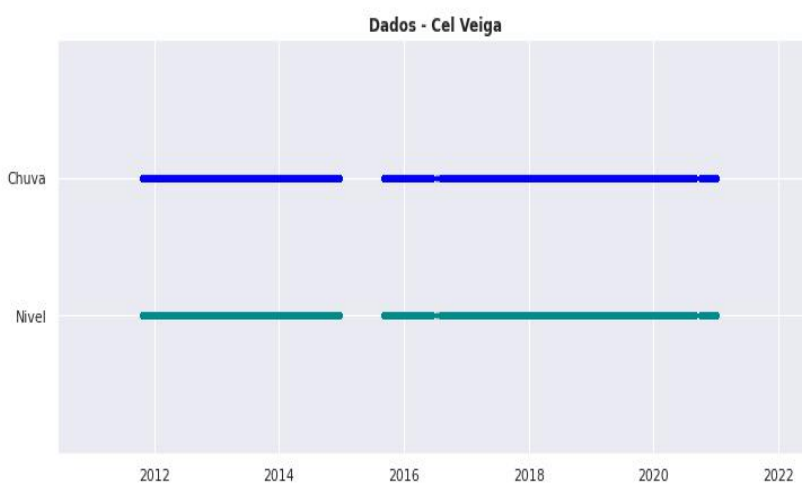


Figura 7: Continuidade da série de dados de chuva e nível da estação Coronel Veiga

4.2. Eventos de transbordamento na estação Coronel Veiga

O INEA determina a cota de transbordamento da estação Coronel Veiga, referente ao Rio Quitandinha de 2,30m e a partir deste valor, na série de dados disponíveis foram selecionados os eventos em que o nível da estação excedeu esta

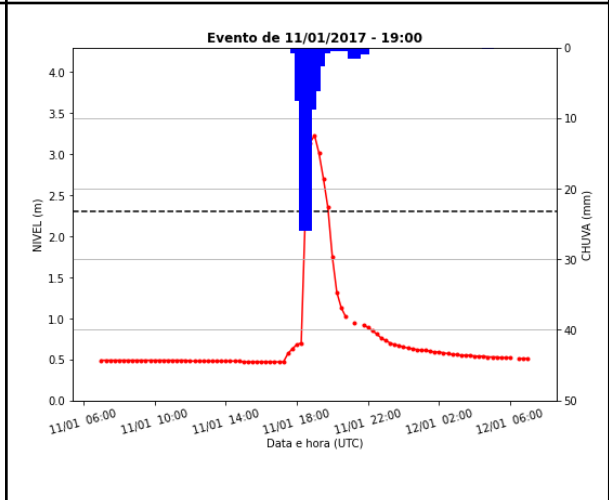
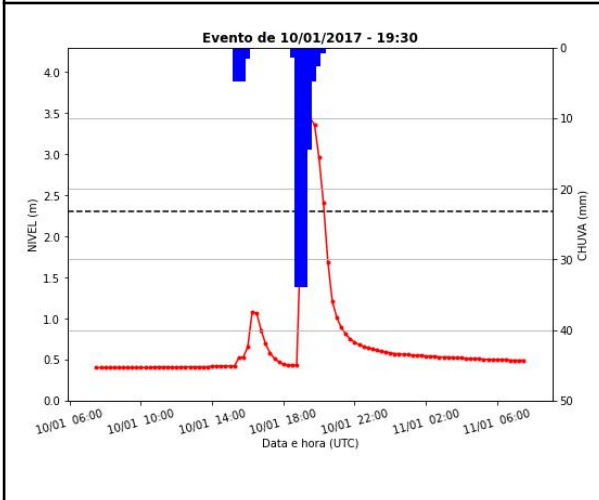
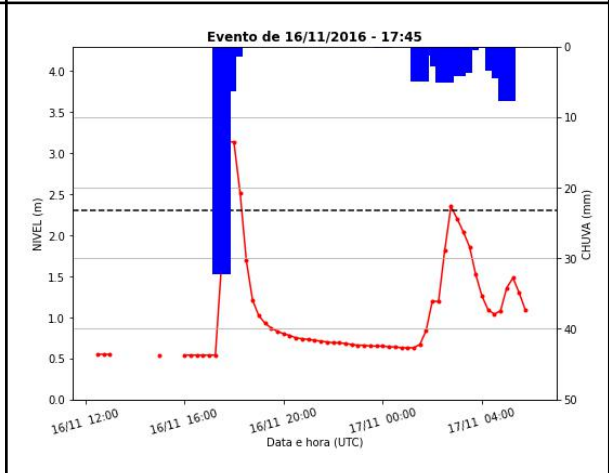
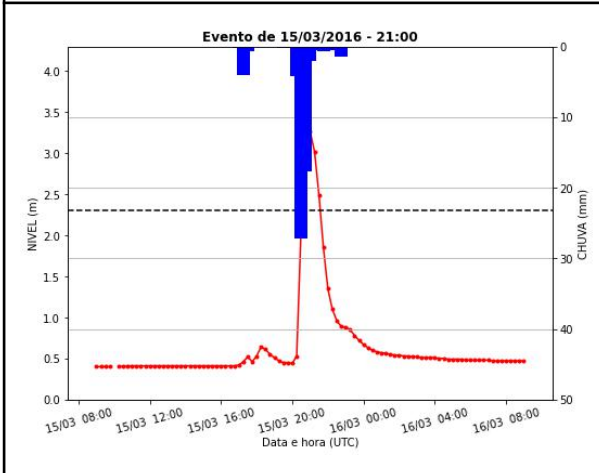
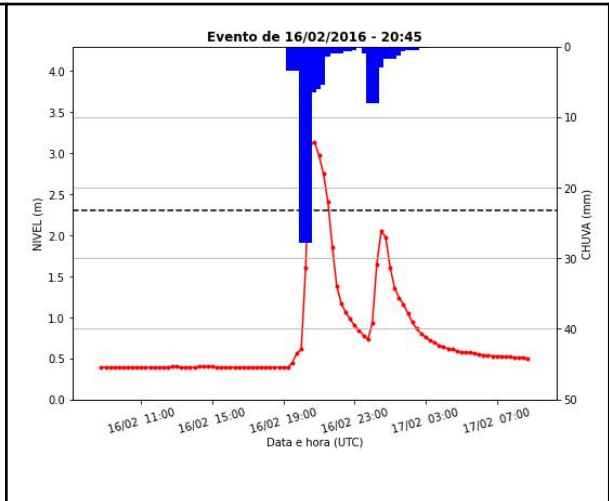
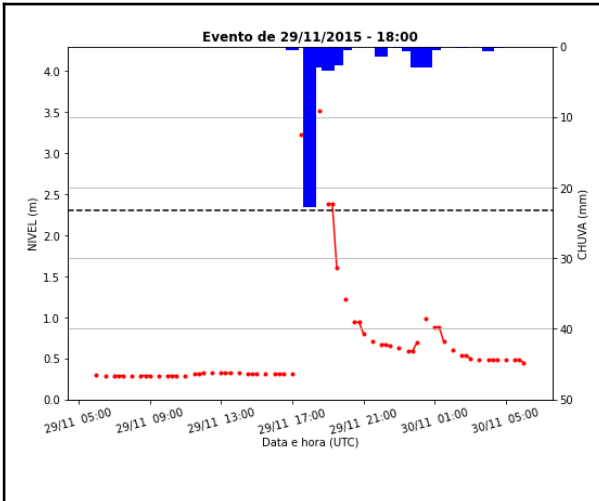
cota. Com isso, foram selecionados 92 eventos de transbordamento referentes a esta estação.

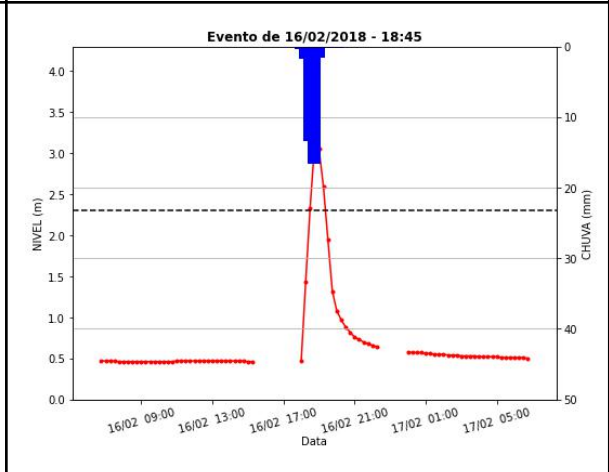
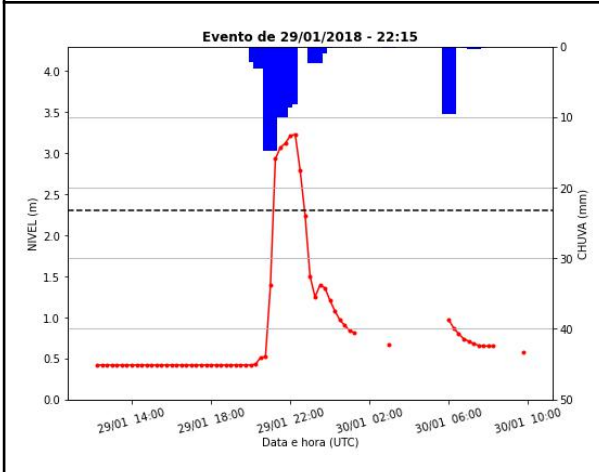
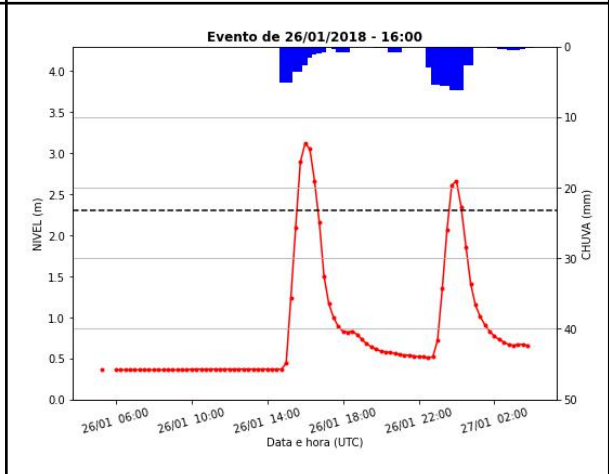
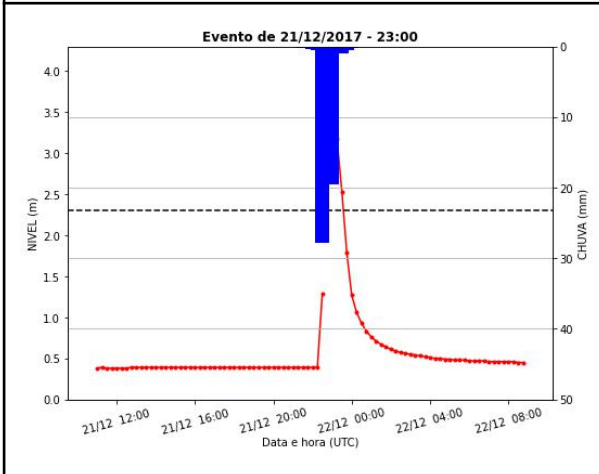
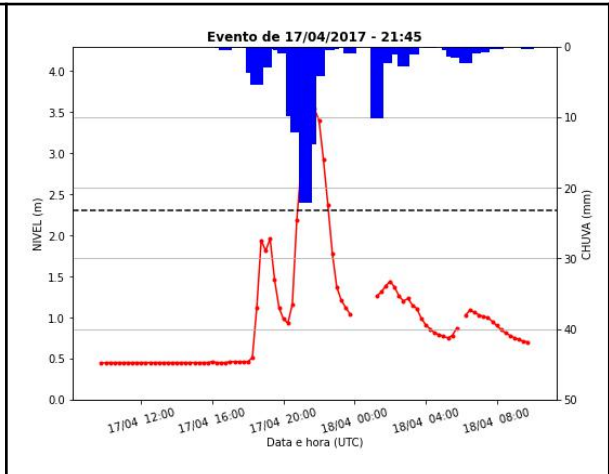
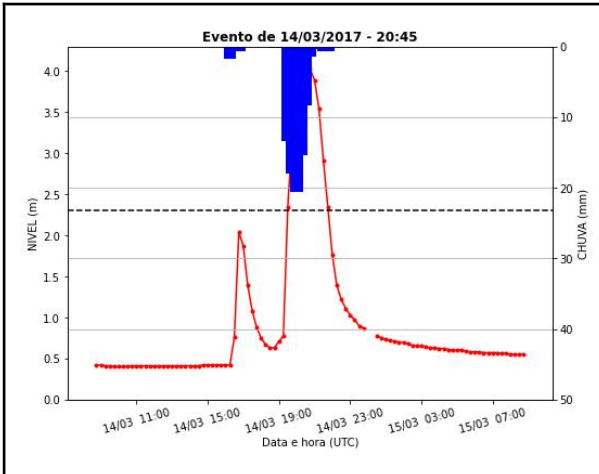
Tabela 2: Estatísticas de eventos de transbordamento

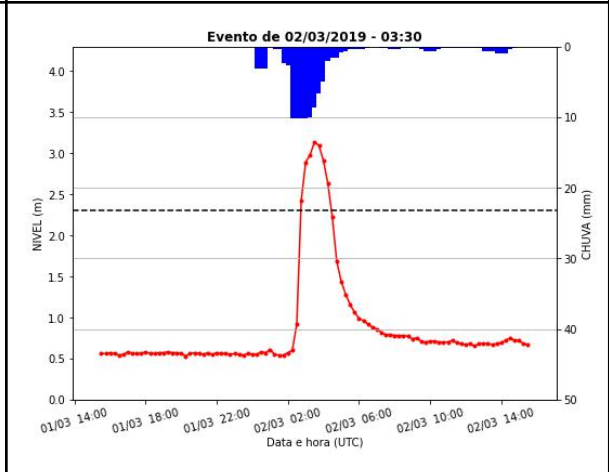
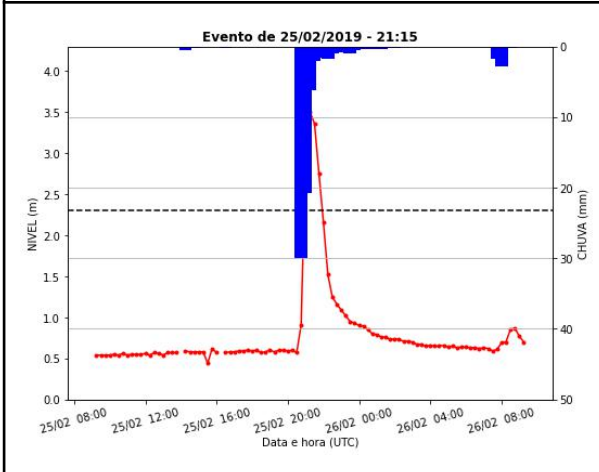
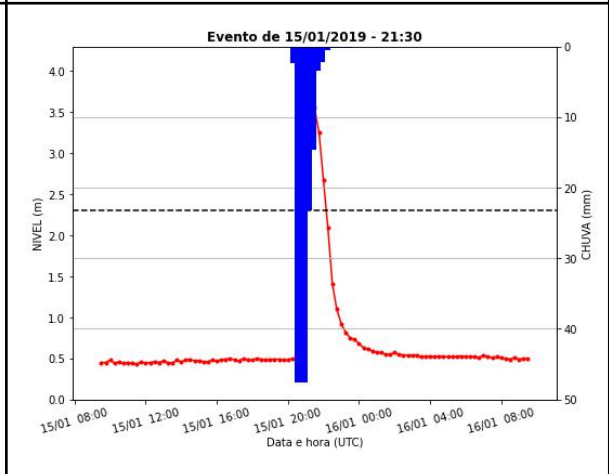
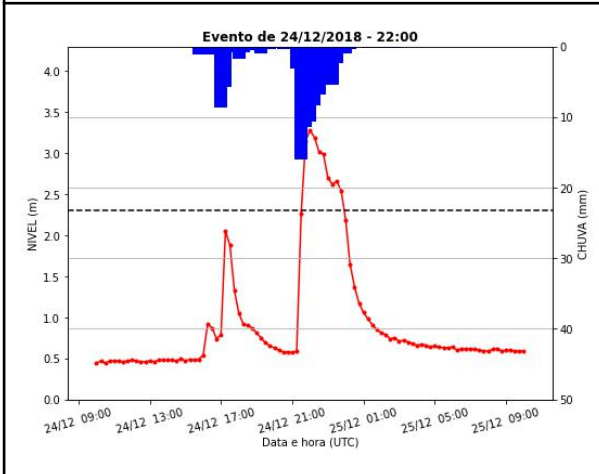
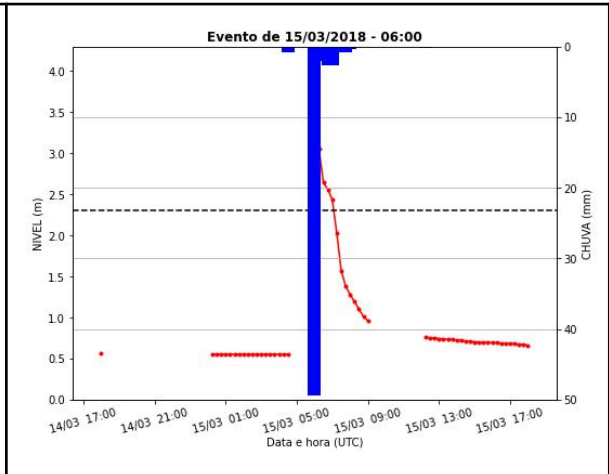
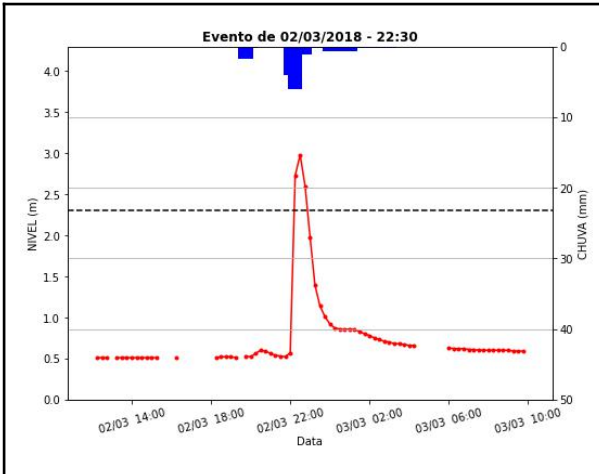
Total de eventos	92 ocorrências
Nível Máximo registrado	4,28 m
Média do Nível Máximo no Evento	2,85 m
Desvio padrão dos Níveis máximos	0,43 m

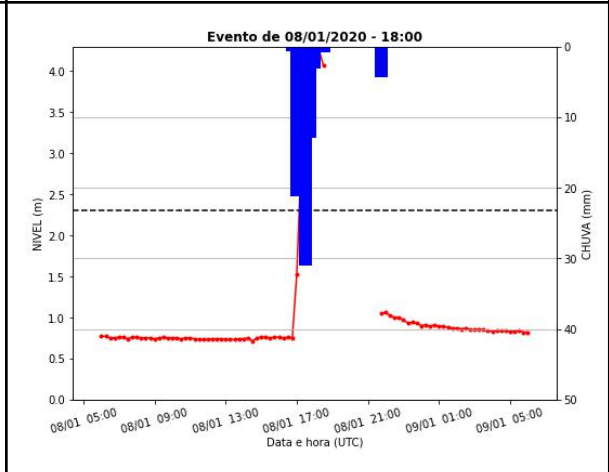
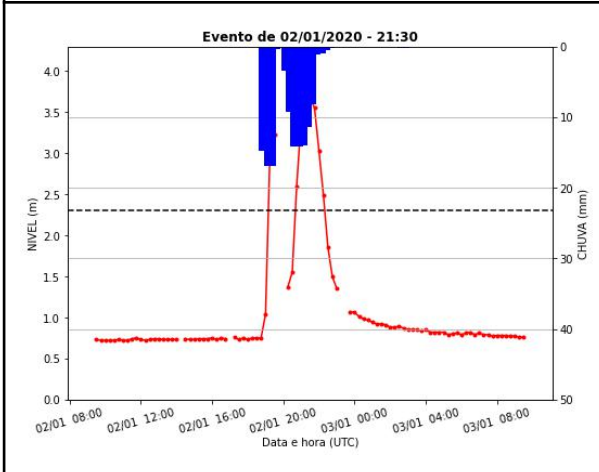
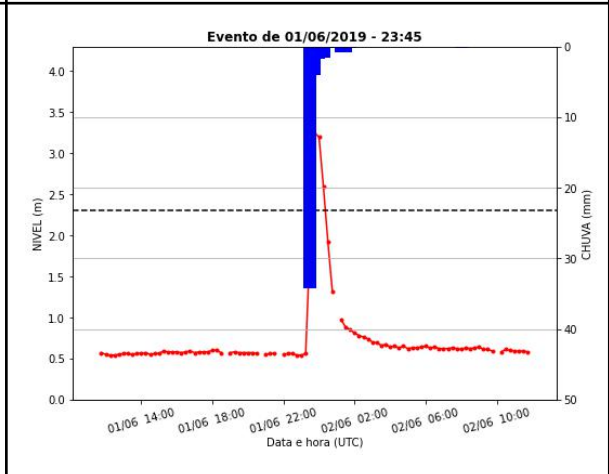
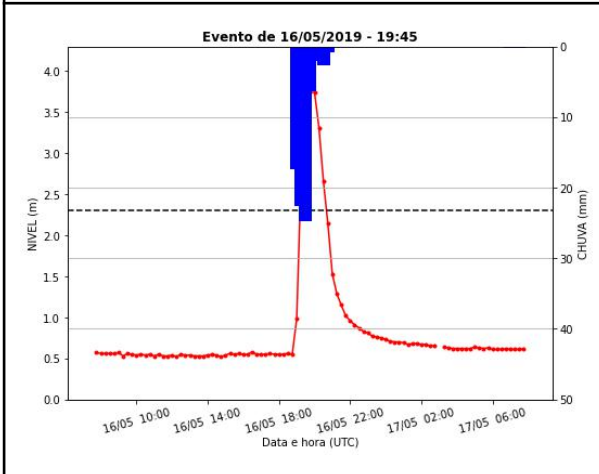
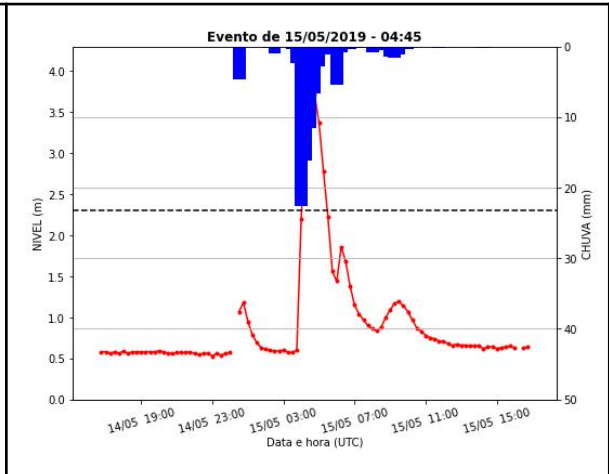
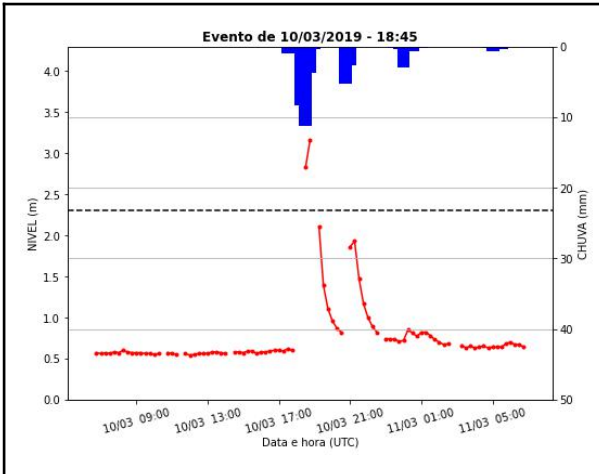
A partir dos 92 casos de transbordamento identificados, foi definido o percentil 70 - referente ao nível de 2,98m - para análise, com objetivo de obter uma amostra mais consistente de dados. Desta forma, foram analisados 27 casos de transbordamento, onde foram gerados os seguintes gráficos. A escolha do percentil 70 teve como objetivo considerar uma amostra de eventos de transbordamentos do rio Quitandinha.

Na Figura 8 são mostrados os cotogramas do rio Quitandinha para cada um dos 27 eventos de transbordamentos acima do percentil 70. A linha vermelha representa o nível medido do rio Quitandinha e as barras azuis são os acumulados pluviométricos registrados. Para todos os casos pode-se verificar subjetivamente uma rápida resposta do rio Quitandinha, onde os picos máximos são observados em seguida aos registros de chuva.









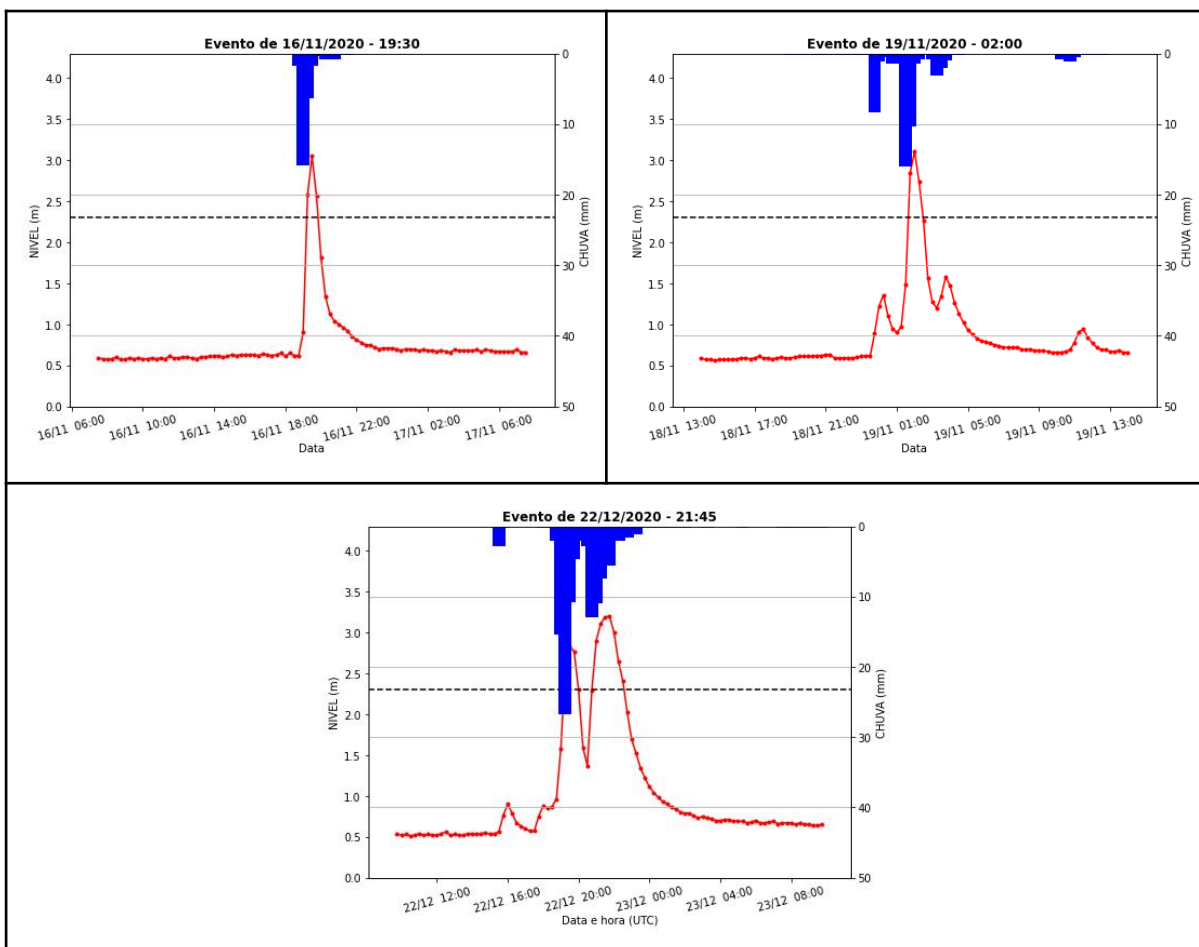


Figura 8: Cotagramas para os 27 eventos selecionados

Utilizando o método gráfico (o método direto visto na Seção 3) foi determinado o tempo de concentração dos eventos selecionados. Dentre os eventos selecionados, em função da falta de algumas leituras referentes aos eventos de 29/11/2015, 15/03/2018, 10/03/2019 e 08/01/2020 não foi possível determinar o tempo de concentração pelo método direto.

Tabela 3: Tempo de concentração estimado pelo método direto

Data do evento	Tempo de concentração (min)
29/11/2015	Inconclusivo

16/02/2016	240
15/03/2016	180
16/11/2016	120
10/01/2017	180
11/01/2017	180
14/03/2017	240
17/04/2017	180
21/12/2017	180
26/01/2018	150
29/01/2018	180
16/02/2018	150
02/03/2018	180
15/03/2018	Inconclusivo
24/12/2018	210
15/01/2019	240
25/02/2019	150
02/03/2019	180
10/03/2019	Inconclusivo
15/05/2019	180

16/05/2019	180
01/06/2019	150
02/01/2020	180
08/01/2020	Inconclusivo
16/11/2020	120
19/11/2020	120
22/12/2020	300
Média do Tempo de Concentração (Tc)	181 min
Desvio padrão do Tc	42,9 min

Partindo do método direto, utilizando os gráficos acima, o tempo de concentração foi em média de 3 horas para o Rio Quitandinha utilizando como referência a estação Coronel Veiga. Observado o desvio padrão, que indica o grau de variação da amostra, o tempo de concentração não apresentou tão significativa variação de um evento para outro dentre os 23 casos em que se aplicou o método, representando cerca de 24% da média.

4.3. Comparação do tempo de concentração: método direto *versus* método indireto

Algumas fórmulas matemáticas são aplicadas para determinação do tempo de concentração a partir das características do local de estudo. Foi feita uma comparação entre o método direto visto acima e algumas formulações do método indireto. As equações escolhidas foram as de Temez, Pasini, Picking e Ven Te Chow. Para isto, foram calculados os valores médios da área, comprimento e declividade.

- Área da Bacia: 23,5 km²

- Comprimento: 7,2 km
- Declividade: 0,00795 m/m

Comparando os valores encontrados de tempo de concentração (Tabela 4), pode-se afirmar que o método de Temez foi o que mais se aproximou do valor encontrado diretamente no gráfico. De acordo com Mata-Lima (2007) este método é recomendado para bacias naturais de até 3000 km² e muito utilizado. O método de Pasini superestimou o valor do tempo de concentração enquanto os métodos de Picking e Ven Te Chow subestimaram o tempo de concentração. A partir disso, é possível observar que os valores do tempo de concentração variam de acordo com o método, evidenciando que para uso do método direto é preciso escolher corretamente o método de acordo com as características do local. A variância entre os métodos indiretos se mostrou maior do que a variância entre os dados da amostra utilizada no método direto.

Tabela 4: Tabela comparativa do tempo de concentração estimado pelo método direto e pelos métodos indiretos escolhidos.

Método	Tc (min)
Direto	181
Fórmula de Temez	202
Fórmula de Pasini	401
Fórmula de Picking	99
Fórmula de Ven Te Chow	96

4.4. Classificação dos eventos meteorológicos

Para classificação dos sistemas meteorológicos que favorecem os transbordamentos do rio Quitandinha foram utilizadas imagens de satélite dos canais

infravermelho e visível, assim como cartas sinóticas de superfície da Marinha do Brasil e cartas de superfície e de altos níveis do CPTEC. Com isso, foi feita uma classificação do evento meteorológico que resultou no evento de transbordamento em tempestade convectiva (TC), frente fria (FF) e ZCAS. O termo Tempestade Convectiva (TC) foi utilizado neste trabalho englobando eventos de efeito local (como aqueles gerados pela junção de calor e umidade), eventos dados por pré-frontal e os eventos que foram influenciados indiretamente por sistemas transientes nas proximidades, considerando assim gatilhos dinâmicos (Tabela 5).

Essa divisão dos fenômenos de Tempestade Convectiva (TC) levou em consideração as três subcategorias definidas por Barry e Chorley (2009), onde tempestades convectivas podem ser aquelas por células convectivas dispersas que se desenvolvem por forte aquecimento da superfície, células convectivas geradas por ar frio, úmido e instável passando sobre uma superfície mais quente e também células associadas a ciclones tropicais.

Tabela 5: Classificação do evento meteorológico relacionado ao evento de transbordamento.

Data do evento	Classificação
29/11/2015	TC
16/02/2016	TC
15/03/2016	TC
16/11/2016	TC
10/01/2017	TC
11/01/2017	TC
14/03/2017	TC
17/04/2017	FF

21/12/2017	TC
26/01/2018	TC
29/01/2018	ZCAS
16/02/2018	TC
02/03/2018	TC
15/03/2018	TC
24/12/2018	TC
15/01/2019	TC
25/02/2019	TC
02/03/2019	ZCAS
10/03/2019	TC
15/05/2019	FF
16/05/2019	TC
01/06/2019	FF
02/01/2020	ZCAS
08/01/2020	TC
16/11/2020	TC
19/11/2020	FF
22/12/2020	ZCAS

A partir da classificação acima com a amostra utilizada, é visto que cerca de 70% dos casos de transbordamento no Rio Quitandinha usando como referência a estação Coronel Veiga (INEA) foi causado por Tempestade Convectiva (TC) dentro dos parâmetros colocados acima, onde cerca de 15% foram causados por eventos de ZCAS e 15% por eventos de Frente Fria atuando sobre a região. Desconsiderando os 4 eventos onde a determinação do tempo de concentração foi inconclusiva e portanto, considerando uma amostra de 23 casos, foi calculado o tempo de concentração médio para os eventos de TC, FF e ZCAS (Tabela 6).

Tabela 6: Tabela do tempo de concentração médio do evento de transbordamento em relação ao evento meteorológico relacionado.

Classificação	Tc médio (min)
TC	180
FF	158
ZCAS	210

Os eventos de TC e FF apresentaram resultados semelhantes e mais próximos do tempo de concentração médio de todos os eventos. Nesta média, o evento de ZCAS apresentou maior tempo de concentração, contudo a amostra é muito pequena para um resultado conclusivo em relação aos eventos tanto de ZCAS quanto de FF. Já os eventos de TC, em função da amostra maior que neste caso é de 15 ocorrências, podem fornecer dados com melhor correlação. Desta forma, podemos considerar que o tempo de concentração não apresenta grande variação em função do evento meteorológico responsável pelo transbordamento.

4.5. Relação do evento de transbordamento com os acumulados de chuva

Considerando o horário de nível máximo da estação no evento de transbordamento, foi feito um boxplot considerando os eventos de transbordamento (92) em relação aos acumulados de chuva em 1h, 2h, 3h, 6h, 12h e 24h (Figura 9).

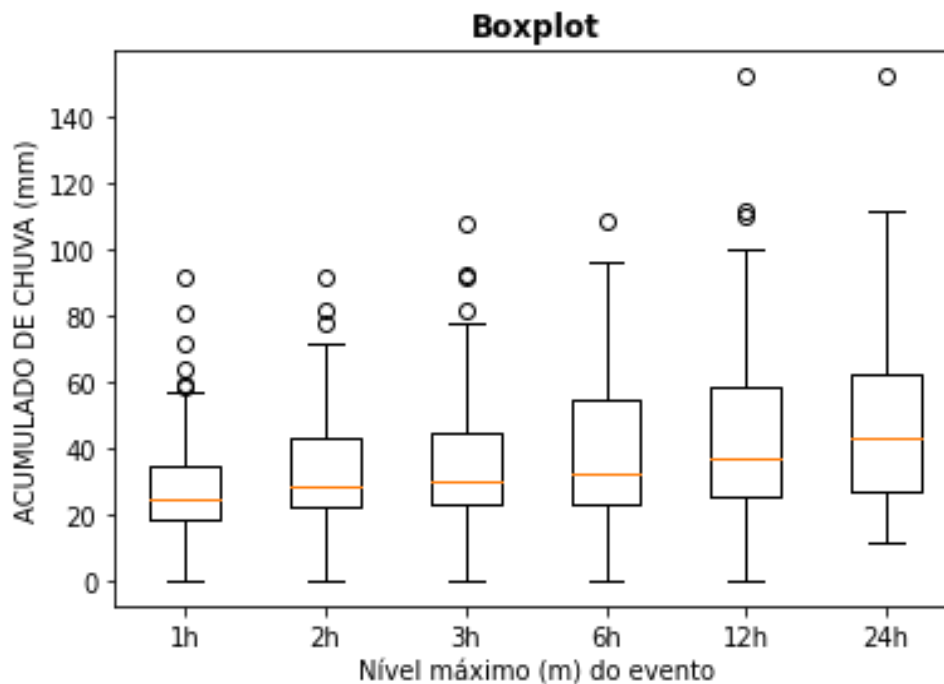


Figura 9: Boxplot dos acumulados de chuva antecedentes de chuva para todos os eventos de transbordamento do rio Quitandinha

A partir do gráfico acima é possível ver que a melhor relação encontrada - onde há menor dispersão dos dados e no gráfico os pontos são observados em caixas menores - entre precipitação x transbordamento é dada com o acumulado de 1h e que acumulados referentes a muitas horas antes do evento - como 12h e 24h - não apresentaram boa relação.

Na Figura 9 é possível ver que os eventos de transbordamento no Rio Quitandinha possuem acumulados médios de 29,1 mm/1h, com ocorrências de maiores acumulados, como se pode ver nos pontos *outliers*. Os acumulados referentes a 2h e 3h se mostraram próximos, com média de 32,9 mm e 35,6 mm respectivamente. Já os acumulados de 6h, 12h e 24h - que não apresentaram boa relação - foram de 39,9 mm, 44,0 mm e 48,7 mm, respectivamente. Com isso, é observado que os maiores acumulados em 1h se mostraram mais propícios a casos de transbordamento e por isso precisam ser tratados com mais cautela nos eventos de chuva, sendo assim uma complicação na tomada de decisão, visto o tempo de ação bem curto.

Foi feita uma classificação quanto aos acumulados em 1h, 2h, 3h, 6h, 12h e 24h considerando o momento do nível máximo dos eventos de transbordamento referentes ao percentil 70 e utilizando estes dados, onde foi feita a média e desvio padrão destes acumulados nos eventos de TC, FF e ZCAS.

A partir das tabelas 7 a 9 é possível perceber que os casos de transbordamento relacionados a eventos de TC no percentil 70 (nível $\geq 2,977\text{m}$) teve a média de 45,8mm/1h, onde a média dos demais acumulados - 2h, 3h, 6h, 12h e 24h - ficou entre 45,8 mm/1h e 55,2 mm/24h, sendo assim uma variação não muito significativa.

O valor médio (45,8 mm/1h) referente ao acumulado em 1h dos casos de TC se mostrou semelhante nos eventos de ZCAS e nos eventos de FF, 44,7mm/1h e 46,7mm/1h respectivamente. Contudo, os valores médios de todos os acumulados se mostraram maiores para os eventos de FF e ZCAS em relação aos casos de TC, onde os casos classificados como ZCAS apresentaram maiores acumulados, com acumulados em 24h perto de 23mm acima em relação ao acumulado em 24h dos eventos classificados como TC.

O desvio padrão foi calculado visando mostrar a variação da amostra, evidenciando a partir do desvio padrão que houve essa variação, mas ela se mostrou equivalente na maior parte dos casos, com desvio padrão variando entre 21,5 e 27,4 para os eventos de TC, entre 4,7 e 22,5 para os eventos de FF e entre 4,2 e 28,0 para os eventos de ZCAS. A menor dispersão dos dados novamente se mostrou nos acumulados de 1h e 2h, com valores abaixo de 20 mm para os eventos de FF e ZCAS, onde o desvio padrão para os acumulados de 1h e 2h dos eventos de ZCAS tiveram menor dispersão sendo 9,6mm e 4,2 mm, respectivamente.

Tabela 7: Estatísticas dos eventos de TC

Acumulado	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1h	45,8	21,5
2h	46,9	22,3

3h	47,1	22,1
6h	49,0	22,9
12h	49,1	23,0
24h	55,2	27,4

Tabela 8: Estatísticas dos de FF

Acumulado	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1h	46,7	14,7
2h	50,7	17,9
3h	54,6	17,9
6h	58,6	22,5
12h	58,7	22,4
24h	60,5	21,1

Tabela 9: Estatísticas dos eventos de ZCAS

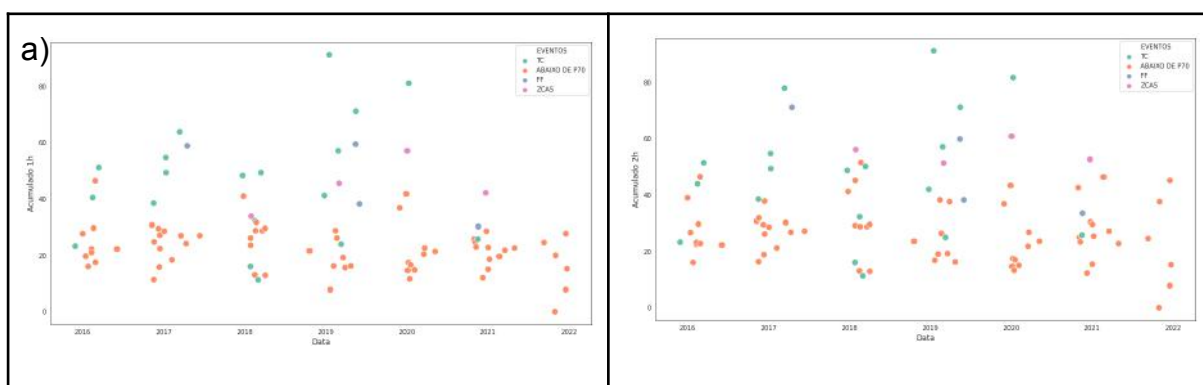
Acumulado	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1h	44,7	9,6
2h	55,2	4,2
3h	77,7	26,6
6h	77,9	26,9

12h	78,6	28,0
24h	78,7	27,8

Na Figura 10, é possível ver a distribuição dos casos de transbordamento em relação aos acumulados. Em relação aos casos de TC, todos os acumulados se mostraram bem distribuídos assim como nos casos de FF e nos eventos classificados como ZCAS os acumulados se mostraram mais elevados, como visto anteriormente nas tabelas 08 e 09. Nestes gráficos é possível ver os maiores acumulados associados aos eventos de ZCAS onde, por exemplo, nos acumulados referentes a 2h, os eventos apresentaram valores acima de 50mm. Esses padrões com suas devidas proporções, são mantidos em relação aos demais acumulados.

É importante ressaltar que a amostra de casos de TC é consideravelmente maior do que as amostras de FF e ZCAS no percentil 70. Desta forma, é preciso levar em consideração que esta estatística apresenta resultado mais consistente nos casos de TC.

Os resultados apresentados são concordantes com Tucci (1993), que afirma que para bacias pequenas (<500 km²) as precipitações convectivas de alta intensidade, pequena duração e distribuídas numa pequena área, podem provocar grandes enchentes. O autor afirma que para bacias maiores as precipitações mais importantes passam a ser as do tipo frontais, que atingem grandes áreas com intensidade média. Utilizando um maior conjunto de dados para classificar os eventos meteorológicos atuantes nos eventos de transbordamento, é possível obter melhores resultados.



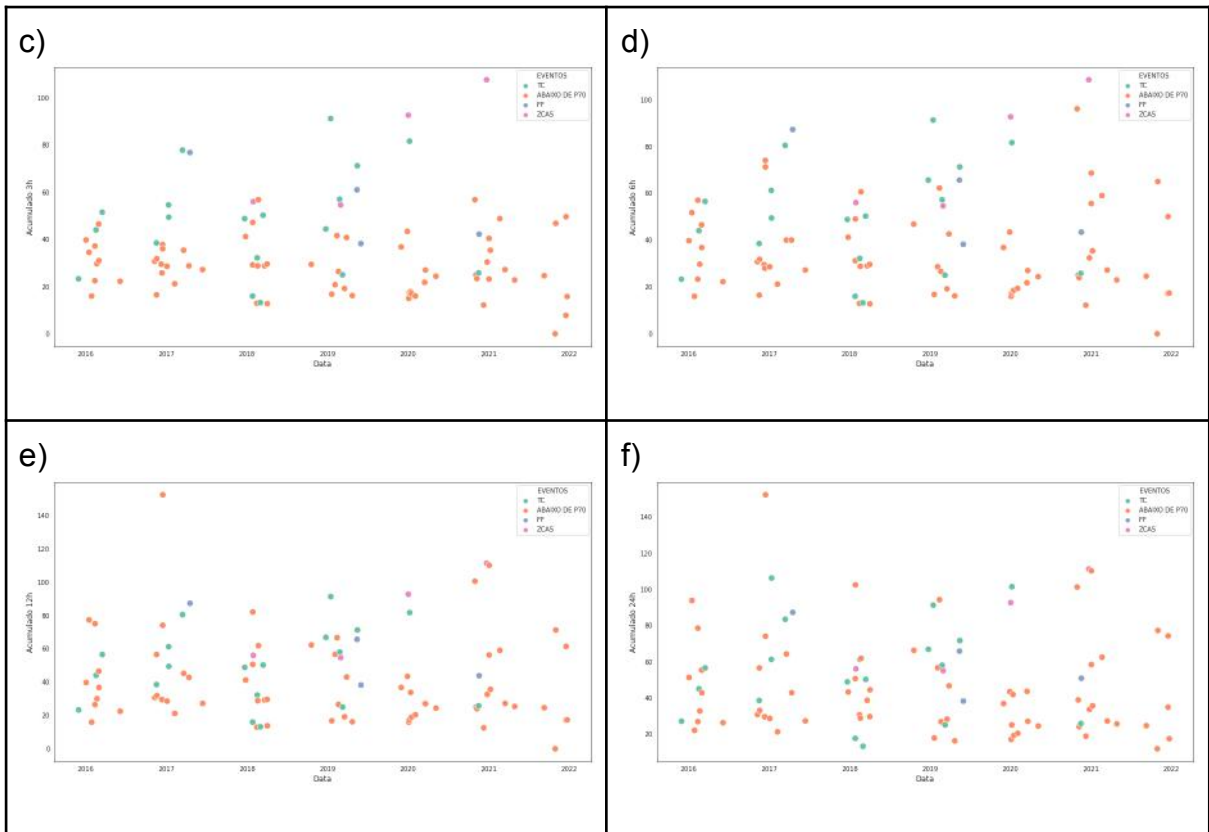


Figura 10: Distribuição dos eventos de transbordamento em relação aos acumulados de 1h (10a), 2h (10b), 3h (10c), 6h (10d), 12h (10e) e 24h (10f) com destaque para os casos de TC, FF e ZCAS classificados no percentil 70.

5. Conclusões e considerações finais

O trabalho teve como objetivo avaliar a relação entre os eventos de transbordamento no Rio Quitandinha no município de Petrópolis, que constantemente é afetado por episódios desta natureza e os eventos de chuva, utilizando a estação Coronel Veiga do INEA como parâmetro.

No período utilizado foram identificados 92 casos de transbordamento e foi possível traçar uma relação entre estes dois eventos: precipitação e transbordamento.

Além disso, foi feita uma classificação quanto ao fenômeno meteorológico que desencadeou a chuva responsável pelo evento de transbordamento, onde ficou evidente que a maior parte dos eventos se deu por uma tempestade convectiva, definição neste trabalho que foi aplicada englobando tempestades provenientes de calor e umidade e tempestades provenientes de perturbações atmosféricas em função de sistemas transientes. Contudo, é válido considerar que a atmosfera é dinâmica e às vezes possui mais de um gatilho em uma tempestade como estas.

Os eventos de tempestade convectiva, muitas vezes eventos de tempo severo, são os eventos meteorológicos com maior potencial de risco. As tempestades convectivas, geradas por nuvens de extensão vertical com fortes correntes verticais, possuem menor tempo de duração, mas ainda assim merecem destaque nos estudos em função dos riscos associados e em sua incerta previsibilidade; neste ponto, o *nowcasting* se faz indispensável. Mesmo com a maior parte dos eventos de tempo severo serem relacionados a eventos de tempestade convectiva, não se deve negligenciar o estudo de outros eventos por mais raro que sejam, uma vez que sua ocorrência pode seguir outros padrões e oferecer riscos à população.

Foram feitas estatísticas dos eventos de transbordamento e determinado o tempo de concentração dos eventos, que é uma significativa variável quando se trata de um rio importante como é o caso do Quitandinha. A determinação do tempo de concentração foi feita utilizando diferentes métodos para fins de comparação, onde foi evidenciado que as características do local e do evento são importantes para entender variáveis como esta. É válido ressaltar que para o melhor

entendimento do tempo de concentração bem como de outros aspectos relacionados, é importante conhecer melhor toda sua área de contribuição e a relação da precipitação com as demais regiões.

O trabalho também teve como motivação mostrar a importância da Meteorologia, principalmente a área Operacional, para a população. O meteorologista tem grande responsabilidade em transmitir as informações para a população e para os órgãos tomadores de decisões, visto que informações mais acuradas podem ser cruciais para que estratégias sejam traçadas e colocadas em práticas, podendo salvar vidas. No tema deste trabalho, diversos trabalhos podem ser realizados. Além do tempo de concentração, podem ser determinados outros parâmetros como o tempo de resposta e o tempo de crescimento que não foram abordados neste trabalho, mas são sugestões para trabalhos futuros.

O tempo de concentração se caracteriza como o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia, deslocar-se até a seção principal. Neste trabalho, para o cálculo do tempo de concentração foram utilizados os dados de precipitação e nível de rio da estação telemétrica (dados coletados a cada 15 minutos) Coronel Veiga pertencente ao INEA entre os anos de 2011 e 2021 considerando a abordagem do método direto. Os resultados iniciais mostram que grande parte (70%) dos casos de transbordamento do rio Quitandinha estiveram associados a ocorrência de chuvas intensas geradas por tempestades convectivas – TC (ausência de sistemas sinóticos transientes), seguidos pela passagem de frentes frias – FF (15%) e a configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS (15%). Para o tempo de concentração verificou-se a média e desvio padrão foram, respectivamente, 181 minutos (3 horas) e 42 minutos considerando todos os eventos de transbordamento. Analisando em subcategorias verificou-se o tempo de concentração médio de 180 minutos para os eventos de TC, 158 minutos para FF e 210 minutos para os eventos de ZCAS. Espera-se, que os resultados obtidos contribuam para avaliações de padrões hidrometeorológicos na região com ênfase a emissão de alertas e mitigação dos possíveis danos socioeconômicos na cidade de Petrópolis.

6. Referências Bibliográficas

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Cemaden e IBGE lançam base de dados sobre população exposta em áreas de risco de desastres. Disponível em:

<http://www2.cemaden.gov.br/cemaden-e-ibge-lancam-base-de-dados-sobre-populacao-exposta-em-areas-de-risco-de-desastres/#:~:text=Na%20regi%C3%A3o%20Sul%2C%20em%20144,expostos%20ao%20risco%20de%20desastres>. Acesso em: 19 set. 2022.

INSTITUTO MUNICIPAL DE CULTURA DE PETRÓPOLIS. (org.). História. Disponível em:

<https://www.petropolis.rj.gov.br/imc/index.php/petropolis/historia#:~:text=A%20funda%C3%A7%C3%A3o%20da%20cidade%20de,exuber%C3%A2ncia%20e%20amenidade%20do%20clima>. Acesso em: 13 ago. 2022.

ALVES, Isabelle Salazar Vieira. Suscetibilidade a inundações do município de petrópolis, rio de janeiro, brasil. Anais do XIV ENANPEGE... Campina Grande: Realize Editora, 2021.

BANCO MUNDIAL. Avaliação de perdas e danos: inundações e deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro em Janeiro de 2011. Relatório Técnico. Brasília: 2012.

BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. Atmosphere, weather and climate. Routledge, 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Classificação e codificação brasileira de desastres (Cobrade): categoria, grupo, subgrupo, tipo, subtipo. Brasília: Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2012.

CARVALHO, S. L., PRODANOFF, J. H. A e ROTUNNO FILHO, O.C.

“Geoprocessamento Aplicado na Avaliação da Poluição Difusa em Bacia Urbana na

Região Serrana do Rio de Janeiro”. In: Anais do V Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, pp. 1-6, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, nov. 2013.

DE LENCASTRE, Armando Coutinho; FRANCO, F. Melo; ANTUNES, Miguel Teles. Lições de hidrologia. 2ª Edição revista, 1992. .

DE OLIVEIRA SENA, Jaricélia Patrícia; LUCENA, Daisy Beserra; DO NASCIMENTO RIBEIRO, George. Eventos extremos de precipitação no sertão paraibano: Variação espaço-temporal. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 12, n. 4, p. 748-755, 2017.

GOERL, Roberto Fabris; MICHEL, Gean Paulo; KOBAYAMA, Masato. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. Revista brasileira de cartografia. Vol. 69, n. 1 (2017), p. 61-69, 2017.

GONZALES, F. C. G. Projeto de drenagem sustentável para mitigação de cheias na bacia do rio Quitandinha, em Petrópolis, RJ. 2014. Tese de Doutorado. Dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (org.). Petrópolis: panorama. Panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama>. Acesso em: 14 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. População em áreas de risco no Brasil. 2018

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. (org.). Dados da Região Hidrográfica: Piabanha. Disponível em: Dados da Região Hidrográfica: Piabanha. Acesso em: 13 out. 2022.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

JÚNIOR, FARIAS. JEF de; BOTELHO, RGM Análise Comparativa do Tempo de Concentração: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Cônego, Município de Nova Friburgo/RJ. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, n. 21, p. 1-20, 2011.

LOU, Rodrigo Furtado. Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ. RJ, 2010.

MATA-LIMA, Herlander et al. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. Rem: Revista Escola de Minas, v. 60, p. 525-536, 2007.

MORAIS, Carlos. Escalas de medida, estatística descritiva e inferência estatística. 2005.

NASCIMENTO, Ernani de Lima. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.

PELECH, André Souza; DE OLIVEIRA PEIXOTO, Maria Naíse. Estilos fluviais da bacia hidrográfica do Rio Quitandinha (Petrópolis, RJ): aplicação de uma classificação geomorfológica de rios em uma área montanhosa urbanizada. Revista Brasileira de Geografia, v. 66, n. 2, p. 35-74, 2021.

RAMOS, Catarina. Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. 2013.

SCHROETER, Serena et al. Forecasting the impacts of severe weather. Australian Journal of Emergency Management, v. 36, n. 1, p. 76-83, 2021.

SENEVIRATNE, Sonia I. et al. 11 Chapter 11: Weather and climate extreme events in a changing climate. 2021.

SILVA, Fabricio Polifke da. PREVISÃO DE TEMPESTADES SEVERAS E DE TRANSBORDAMENTOS NO RIO QUITANDINHA – PETRÓPOLIS/RJ. 2019. 284 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil,, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

TUCCI, Carlos EM. Hidrologia: ciência e aplicação. rev. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (org.). What are the two types of floods? Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-two-types-floods>. Acesso em: 09 out. 2022.

UNITED STATES. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (org.). Extreme Weather. Disponível em: <https://www.climatehubs.usda.gov/content/extreme-weather>. Acesso em: 10 out. 2022.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (org.). Flash Flood Guidance System with Global Coverage (FFGS). Disponível em: <https://public.wmo.int/en/projects/ffgs>. Acesso em: 11 out. 2022.