



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,**  
**INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA – CITA**

**TENDÊNCIA TEMPORAL E ESTIMATIVA DO RISCO**  
**HIDROLÓGICO DE EXTREMOS MÁXIMOS DE CHUVA E**  
**VAZÃO EM RIO BRANCO, ACRE**

**ADRIANA VALENTE DE OLIVEIRA**

RIO BRANCO, AC  
ABRIL/2020

**ADRIANA VALENTE DE OLIVEIRA**

**TENDÊNCIA TEMPORAL E ESTIMATIVA DO RISCO  
HIDROLÓGICO DE EXTREMOS MÁXIMOS DE CHUVA E  
VAZÃO EM RIO BRANCO, ACRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências e Inovação Tecnológica**.

**Orientador: JOSÉ GENIVALDO DO VALE MOREIRA**

**Co-orientador: RODRIGO OTÁVIO PERÉA SERRANO**

RIO BRANCO, AC  
ABRIL/2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA**  
**PARA A AMAZÔNIA – CITA**

**TENDÊNCIA TEMPORAL E ESTIMATIVA DO RISCO**  
**HIDROLÓGICO DE EXTREMOS MÁXIMOS DE CHUVA E**  
**VAZÃO EM RIO BRANCO, ACRE**

**ADRIANA VALENTE DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Prof. Dr. JOSÉ GENIVALDO DO VALE MOREIRA  
UFAC/CITA – Orientador

---

Prof. Dr. WALDEMIR LIMA DOS SANTOS  
UFAC/CFCH

---

Prof. Dr. RICARDO RIBEIRO DO NASCIMENTO  
UFAC/CCET

*À todas as mulheres que se dedicam a fazer a diferença e que desejam e sonham com a igualdade de oportunidades, por mais utópico que seja. Especialmente para aquelas que se desdobram e lutam diariamente para realizar seus sonhos, e quando os realizam, sofrem, pois sabem que embora sejam fortes e vencedoras, não puderam administrar tudo harmonicamente, como gostariam.*

Dedico

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e disposição para enfrentar todos os desafios a que me proponho encarar, apesar das dificuldades.

Agradeço imensamente à minha mãe, Angélica Valente pelo exemplo de honestidade, dedicação ao trabalho e superação frente aos obstáculos da vida e pela educação oferecida a mim e meus irmãos Alexandra e Manassés fontes de inspiração para a minha vida, cada um a seu modo.

Agradeço aos meus três filhos, Luanna Taynah, Miguel Imani e Mariana pois é por eles e para eles que me dedico aos estudos e ao aprimoramento da minha profissão, tendo sempre a convicção de que através do exemplo eles também serão profissionais éticos e comprometidos.

Agradeço à minha segunda família através da Dona Evilázia Sampaio que também é um exemplo de ser humano e aos meus irmãos Elisângela, Eliane, Cleir, Cleilton e Cleisson, que do mesmo modo são fontes de inspiração para a minha vida.

Agradeço a meu companheiro Josué Santos pelo incentivo e apoio sempre.

Agradeço imensamente a todos os colegas da Prefeitura de Rio Branco, especialmente da Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMEIA) com os quais tive a oportunidade de aprender e amadurecer profissionalmente.

Agradeço ao Programa de Especialização em Economia Regional e Políticas Públicas (ERPP) da Universidade Federal do Acre (UFAC), através dos professores Oleides Francisca, Raimundo Cláudio e Carlito Cavalcanti, pois durante a minha passagem em 2018, me incentivaram através dos exemplos a continuar investindo na minha carreira profissional por meio dos estudos.

Agradeço a todos os colegas do Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia (PPG-CITA), ao secretário da coordenação Márcio Dumont, que sempre está disposto a realizar um bom atendimento aos discentes e a coordenadora do programa Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Clarisse Maia, pelo excelente trabalho realizado à frente do PPG-CITA.

Por fim, agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. José Genivaldo do Vale Moreira, que além de profissional competente e comprometido com os pilares da educação, é um ser humano da melhor qualidade. Agradeço pela paciência em me auxiliar e conduzir sempre aos melhores caminhos para obtenção de mais conhecimento, verdadeiro papel do tutor.

“Nunca somos pequenos demais para fazer a diferença”.

Greta Thunberg

## RESUMO

O registro de eventos hidrológicos extremos ganhou notoriedade nas últimas décadas e, por isso, elementos preconizados de auxílio à tomada de decisão são importantes, tais como a verificação de tendências e a frequência com que ocorrem. Neste contexto, o estudo se concentrou em analisar o comportamento temporal dos registros máximos de chuva e de vazão diária anual anotados na cidade de Rio Branco, Acre, além da análise de frequência, destacando os quantis de referência e suas referidas probabilidades de recorrência. Os resultados apontaram para uma tendência linearmente ascendente, tanto para a vazão quanto para a precipitação pluviométrica, entretanto, não significativa segundo os testes de Mann-Kendall e Spearman Rho ( $\alpha = 5\%$ ), ou seja, concluiu-se pela ocorrência de alterações nos padrões hidrológicos em Rio Branco, ainda que estatisticamente não significativa. Contudo, alerta-se para a precocidade de se atribuir a causa principal de tal alterações (ações antrópicas ou naturais). No tocante à análise de frequência, verificou-se que a distribuição de Gumbel é apropriada ao ajuste dos dados estudados e, com isso, pode-se determinar o quantil de vida útil associado ao risco hidrológico e ao tempo de vida útil de uma empreitada com vistas ao planejamento de ações frente aos impactos de eventos extremos, sobretudo num cenário de inundações severas.

**Palavras-chave:** tendências temporais, variáveis hidrológicas, risco hidrológico, Rio Branco-Acre.

## ABSTRACT

The record of extreme hydrological events has gained notoriety in recent decades, thus recommended elements to aid decision-making are important, such as trend checking and how often these events occur. In this context, this study focused on analyzing the temporal behavior of the records of maximum rainfall and rain flow annual daily measured in the city of Rio Branco, Acre, in addition to frequency analysis, highlighting the reference of volumes and their reported probabilities of recurrence. The results pointed to a linearly ascending trend, both for flow and rainfall, however, not significant according to the Mann-kendall and the Spearman rho (= 5%). It was, however, concluded by the occurrence of changes in hydrological patterns in Rio Branco, although statistically not significant. However, warning must be given to the precocity of assigning the main cause of such changes (either of anthropic or natural actions). Regarding the frequency analysis, it was found that the Gumbel distribution is appropriate for the adjustment of the data studied and, therefore, it can be determined the quantile of useful duration associated with hydrological risk and the lifespan of a contract with a view to planning actions in the face of the impacts of extreme events, especially in a scenario of severe flooding.

**Keywords:** temporal trends, hydrological variables, hydrological risk, Rio Branco-Acre.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Registro fotográfico da cidade de Rio Branco, em 1910 (lado esquerdo) e na década de 1970 (lado direito).....	26
<b>Figura 2:</b> Localização da área de estudo e das estações dos registros hidrológicos de chuva e vazão em análise. ....	40
<b>Figura 3:</b> Valores de precipitação diária máxima anual registrados em Rio Branco, no período de 1970 a 2018.....	46
<b>Figura 4:</b> Vazões diárias máximas anuais registradas no período de 1968 a 2017, em Rio Branco, Acre.....	47
<b>Figura 5:</b> Comportamento temporal dos registros de precipitação diária máxima anual em Rio Branco, para o período de 1970 a 2018.....	49
<b>Figura 6:</b> Comportamento temporal dos registros de vazão diária máxima anual em Rio Branco, para o período de 1968 a 2017.....	49
<b>Figura 7:</b> Ajuste aos valores máximos de vazão à distribuição de Gumbel, utilizando-se a posição de plotagem de Gringorten, com intervalo de confiança de 95%.....	52
<b>Figura 8:</b> Ajuste aos valores máximos de precipitação pluviométrica à distribuição de Gumbel, utilizando-se a posição de plotagem de Gringorten, com intervalo de confiança de 95%. ....	53
<b>Figura 9:</b> Tempo de retorno de projeto em função do risco hidrológico e tempo de planejamento de uma estrutura de atenuação de impactos de eventos hidrológicos extremos.....	56
<b>Figura 10:</b> Quantil de precipitação associado a tempo de vida útil de uma estrutura de adaptação frente aos impactos de eventos hidrológicos extremos, na cidade de Rio Branco, Acre.....	57
<b>Figura 11:</b> Quantil de vazão associado a tempo de vida útil de uma estrutura de adaptação frente aos impactos de eventos hidrológicos extremos, na cidade de Rio Branco, Acre.....	58

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Países com maior quantidade de pessoas afetadas por desastres naturais em 2018. ....	22
<b>Tabela 2:</b> Países que registraram maior número de pessoas mortas por desastres naturais em 2018. ....	22
<b>Tabela 3:</b> Registro da quantidade de municípios em situação de emergência no período de janeiro a dezembro de 2018, reconhecida pelo Governo Federal, decorrentes de eventos hidrológicos (alagamentos e inundações), por Estado. ....	24
<b>Tabela 4:</b> Resumo dos resultados dos testes de tendências para as séries de precipitações e de vazões diárias máximas anuais registradas em Rio Branco, Acre. ....	50
<b>Tabela 5:</b> Valores dos parâmetros de posição ( $\mu$ ) e escala ( $\sigma$ ) da distribuição de Gumbel para máximos ajustada aos valores de precipitações e vazões diárias máximas anuais em Rio Branco, Acre. ....	52
<b>Tabela 6:</b> Quantis notáveis de vazão e de precipitação pluviométrica máximas anuais para a cidade de Rio Branco, estimados pela distribuição de Gumbel. ....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ENSO	El-nino Southern Oscillation
FAP	Função Acumulada de Probabilidades
GEV	Distribuição Generalizada de Valores Extremos
MVS	Método da Máxima Verossimilhança
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>17</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1. EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS</b> .....	<b>18</b>
2.1.1. Causas e efeitos dos eventos hidrológicos extremos no ambiente urbano.....	19
2.1.2. A cidade de Rio Branco e seu histórico de eventos hidrológicos extremos .....	25
<b>2.2. TENDÊNCIAS TEMPORAIS E ALTERAÇÕES NOS PADRÕES HIDROLÓGICOS</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E RISCO EM SÉRIES HIDROLÓGICAS</b> .....	<b>31</b>
2.3.1. Método da Máxima Verossimilhança (MVS) .....	35
2.3.2. Tempo de retorno e risco hidrológico .....	36
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>38</b>
<b>Geral</b> .....	<b>38</b>
<b>Específicos</b> .....	<b>38</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
<b>4.1. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2. SÉRIES HIDROLÓGICAS</b> .....	<b>40</b>
<b>4.3. MÉTODOS ESTATÍSTICOS ADOTADOS NESTA PESQUISA</b> .....	<b>41</b>
4.3.1. Verificação de tendências nas séries de precipitação e de vazão da região em estudo .....	41
4.3.2. Análise de frequência para os dados de precipitações e vazões diárias máximas anuais na cidade de Rio Branco .....	44
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1. ANÁLISE PRELIMINAR</b> .....	<b>46</b>
<b>5.2. TENDÊNCIAS TEMPORAIS NOS REGISTROS DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO MÁXIMA EM RIO BRANCO</b> .....	<b>48</b>
<b>5.3. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E RISCO DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO MÁXIMA EM RIO BRANCO</b> .....	<b>52</b>
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>59</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>61</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>69</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>71</b>
<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>72</b>
<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>73</b>

*APÊNDICE E* ..... 76

# 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a quantidade de desastres naturais sofreu acentuado incremento, sobretudo aqueles cujas causas são creditadas às alterações nos processos hidrológicos. Todavia, existem evidências da intensa busca do Homem pelo conhecimento sobre a dinâmica dos elementos envolvidos em tais processos desde seus primórdios, uma vez que a água é elemento preponderante ao desenvolvimento humano desde as primeiras civilizações (SOUZA et al., 2016; MOREIRA et al., 2016a).

Dentre os fenômenos hidrológicos, a precipitação pluviométrica e a vazão nos cursos d'água se destacam por causa da incerteza presente no comportamento espacial e temporal, bem como pela forma como atingem as populações que habitam as áreas mais vulneráveis, notadamente diante da ocorrência de eventos extremos. Por isso, o planejamento e gerenciamento adequado dos sistemas hídricos se tornaram muito importantes na sociedade contemporânea já que as estratégias racionais de uso desses recursos são fundamentais para estabelecer ações mitigadoras frente aos impactos de tais eventos (VILANOVA, 2014; TUNDISI; TUNDISI, 2015).

Mesmo diante de evidente avanço da ciência hidrológica nas últimas décadas, sobretudo dos métodos focados em relacionar as vazões e as precipitações, muitos avanços ainda são necessários neste sentido. Santos et al., (2016) garantem que a vazão é uma das variáveis hidrológicas mais estudadas, dada a sua importância econômica e ambiental. Os referidos autores alertam que as várias formas de uso da água, tais como consumo humano e animal, irrigação, hidroeletricidade entre outros, dependem dos padrões verificados no regime de vazões. Já López e Francés (2013) acreditam que a compreensão do processo que resulta em vazões extremas é um dos grandes desafios da ciência hidrológica e, para atenuar os impactos de suas ocorrências, os autores acreditam, adicionalmente, que o estudo da frequência e magnitude são capitais.

Eventos hidrológicos extremos, tais como as inundações, provocadas sobretudo por alterações na relação chuva-vazão, ocorrem com diferente frequência e intensidade, em regiões distintas e os danos são geralmente elevados. Souza et al., (2016) esclarecem que evitar a ocorrência de desastres naturais foge à capacidade humana, todavia, pode-se desenvolver medidas racionalmente capazes de minimizar os seus impactos. Para Tundisi e Tundisi (2015), são muitos os fatores que podem alterar temporalmente o ciclo hidrológico, quer seja aqueles

relacionados às alterações advindas do processo natural do clima ou aqueles associados às diversas atividades humanas.

Recentemente, as discussões sobre as possíveis causas associadas à ocorrência de eventos hidrológicos extremos ganharam notoriedade tanto no meio científico quanto em outras organizações. Muito se tem creditado a ocorrência desses eventos à variabilidade climática, motivada por evidências científicas de que alterações nos padrões do clima, tanto em escala regional quanto global, podem impactar diretamente em diversas variáveis hidrológicas, majoritariamente na relação chuva-vazão. Isso, evidentemente, despertou o interesse da comunidade científica especializada (MARENGO, 2008).

Segundo Moreira e Naghettini (2016) é quase consenso que as alterações climáticas estão ocorrendo e possivelmente se intensificarão. Mas, mesmo havendo divergências no tocante às conclusões, diversos estudos incluem em suas conclusões que muitos problemas relacionados aos eventos hidrológicos extremos podem, sim, estar associados às atividades de natureza antrópica. Para Nunes et al., (2018), os eventos climáticos extremos estão entre as principais manifestações das alterações climáticas, e destacam que a minimização dos impactos decorrentes carece do estudo da magnitude e frequência de suas ocorrências, especialmente no contexto regional.

Neste sentido, Santos et al., (2013) e Santos et al., (2016) destacam que os impactos das alterações climáticas sobre as variáveis hidrológicas já são sentidos e, em alguns casos, são atribuídos aos conflitos por causa de oferta e/ou demanda dos recursos hídricos. Para Marengo (2008), o Brasil é situado em região vulnerável às implicações das possíveis alterações climáticas, principalmente no tocante aos extremos. A Amazônia, por exemplo, é uma área evidentemente vulnerável e, por conseguinte, a área que delimita o estado do Acre.

Diante desse cenário, é preciso lançar mão dos diversos instrumentos científicos concebidos sob o propósito de apurar as relações entre as alterações climáticas e as variáveis hidrológicas. Impulsionada pela recorrente discussão com esse viés, a ciência hidrológica avançou bastante nas últimas décadas e produziu importantes ferramentas de gestão, especialmente as técnicas de apoio à tomada de decisão amparada em modelos que envolvem a aleatoriedade dos registros temporais. Incluem-se, entre tais ferramentas, os modelos capazes de prever os quantis pluviométricos ou de vazão associados à determinada probabilidade de recorrência (SANTOS et al., 2013).

Neste contexto, a verificação de tendências ou outros elementos relacionados à estacionariedade, além da análise de frequência e estimação dos quantis estimados de chuva e

de vazão associados à sua probabilidade de ocorrência são ferramentas importantes para gestão dos recursos hídricos, sobretudo em escala regional, a exemplo do comportamento pluviométrico e fluviométrico registrados na cidade de Rio Branco (ULIANA et al., 2015).

Concernente à precipitação pluviométrica em Rio Branco, Duarte (2005) observou tendência de aumento no volume das precipitações anuais até 1990, seguida de diminuição desse volume até 2003. O autor alerta para a possibilidade de possível relação com ações antrópicas ao longo do tempo. Além disso, pondera que o estado do Acre está localizado em uma região sujeita à influência de diversos fenômenos hidroclimáticos, especialmente o regime de precipitação pluviométrica. Por outro lado, Moreira e Naghettini (2016) não verificaram tendência significativa no regime de precipitações máximas anuais registradas em Rio Branco, para o intervalo temporal de 1971 a 2012. Todavia, Santos et al., (2013) alertam para a possibilidade de flutuações nas condições climáticas na Amazônia brasileira, provocadas por outros fenômenos, a exemplo do ENSO (El-nino Southern Oscillation).

Destarte, o presente estudo se concentra em analisar o comportamento temporal dos registros de chuva e de vazão anotados na cidade de Rio Branco, Acre, destacando possíveis tendências temporais, além de realizar uma análise de frequência para as variáveis hidrológicas em questão, destacando os quantis de referência e suas referidas probabilidades de recorrência.

Portanto, o presente trabalho objetiva subsidiar e auxiliar à tomada de decisões concernentes às políticas públicas relacionadas à gestão dos recursos hídricos na cidade de Rio Branco, Acre, bem como subsidiar pesquisas complementares na região, contribuindo para a preparação da sociedade frente a possíveis impactos de eventos extremos.

## **1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

Os problemas atinentes à dinâmica dos processos hidrológicos e suas relações com outros fatores, como os socioambientais, tornam a bacia hidrográfica um ambiente complexo.

Os desastres naturais geralmente provocam perturbações a um sistema e podem ocasionar danos significativos. As situações de crise exigem, constantemente, a concepção de elementos capazes de prover a sociedade de soluções valiosas frente aos efeitos adversos de desastres naturais, com destaque àqueles inseridos no contexto dos processos hidrológicos.

Mesmo que inúmeras ferramentas tenham sido concebidas para este fim, e que muito se tenha despendido no sentido de promover ações de atenuação dos impactos de eventos hidrológicos extremos, o conhecimento dos processos em escala regional tem sido relatado como instrumentos favoráveis de gestão.

Inserida no contexto amazônico, onde as relações de natureza hidro meteorológicas apresentam, geralmente, comportamento diferenciado, é importante valer-se de instrumentos científicos tais como os conceitos estatísticos para constituir um conjunto de elementos que permitam conhecer melhor a dinâmica envolvida, especialmente no tocante à tendência, frequência e risco com que ocorrem os eventos mais danosos.

Portanto, dada a natureza interdisciplinar, além da contribuição técnico/científica, outros anseios diretos e indiretos se destacam no presente trabalho, tais como formação de pessoal, abertura para novas pesquisas na região estudada, além de contribuir socialmente para a gestão dos recursos hídricos, especialmente para o controle e mitigação dos impactos relacionados a eventos extremos.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Além deste item introdutório, a dissertação contempla outros itens que, sistematizam o trabalho a que propôs a pesquisa, seus resultados a recomendações.

No item 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre o tema em destaque, seguido pelos objetivos almejados com a pesquisa. Logo adiante, são descritos os aspectos metodológicos, sistematizados com vistas aos resultados sobre o que foi posto em hipótese.

Item igualmente importante na conjuntura, o trabalho permitiu a apresentação de resultados favoráveis e proporcionou apropriada discussão à luz do conhecimento que envolve o tema. Daí, permitiu-se extrair conclusões a respeito do que se objetivou com a realização da pesquisa, bem como apresentar recomendações que podem ser úteis na realização de estudos futuros na região em destaque ou até mesmo em regiões com características semelhantes.

Finalmente, são elencadas as referências bibliográficas citadas na dissertação, além de um conjunto que contém os anexos importantes a respeito dos resultados obtidos no presente trabalho.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

“Os desastres naturais não são riscos, eles se tornam por causa do homem, de sua ignorância ou negligência (RANH, 1986)”.

### 2.1. EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS

Os eventos hidrológicos extremos têm sido pauta de muitas discussões e pesquisas em nível regional e global haja visto a frequência e a magnitude com que têm ocorrido em diversas regiões do mundo, acarretando inúmeros prejuízos sociais, ambientais e econômicos.

Define-se evento extremo a ocorrência de uma anomalia ou desvio de comportamento de um padrão médio ou habitual (COUTINHO et al., 2017). De acordo com Marengo et al., (2009), os eventos climáticos extremos ocorrem de muitas formas, como enchentes, secas prolongadas, ondas de calor, tufões e tornados e, apesar dos registros históricos, em muitos casos, datarem de épocas recentes esses eventos não são novidade. Porém a frequência, a quantidade e a intensidade com que ocorrem atualmente seria resposta ao aquecimento anômalo da superfície terrestre, acompanhado de alterações nos padrões climáticas (OSCAR JUNIOR, 2015).

É importante esclarecer as definições utilizadas na literatura sobre os processos envolvidos nas alterações dos padrões climáticos. As alterações climáticas se refletem nas modificações dos padrões estabelecidos pelas variáveis representativas do clima, em especial as variáveis hidrológicas. Estas definições por sua vez, refletem a dificuldade de separar o efeito das atividades humanas daquele produzido pela variabilidade natural do clima (TUCCI, 2003). Como bem classificam Tucci e Braga (2003), **a variabilidade climática** é o processo de variação do clima condicionado por fatores naturais existentes na terra e suas devidas interações. Já a mudança climática, segundo os referidos autores, é o processo de **mudança do clima** creditado às atividades humanas.

Neste sentido, é formidável o que destaca Moreira (2016), segundo o qual é importante observar a definição apresentada por Ishak et al., (2013), que considera a mudança climática como as alterações desencadeadas no processo climático resultante das ações antrópicas, incluindo a emissão de gases do efeito estufa e outros elementos. Nesta conformidade, a variabilidade climática é, então, atribuída às mudanças atinentes às características naturais do clima, ou seja, devido a dinâmica interna do sistema climático.

No que concerne a eventos extremos localizados, sejam hidrológicos ou não, McPhillips (2018) assegura que estes acontecimentos merecem atenção devido ao seu potencial para impactos significativos em sistemas sociais, ecológicos e técnicos atribuindo-os às mudanças climáticas antropogênicas, cujo potencial de impactos vem aumentando devido à localização da urbanização e à expansão dos centros urbanos e de infraestruturas.

Muito embora existam inúmeras incertezas acerca das causas, intensidade e frequência em que os eventos extremos afetarão cada região do planeta, é sabido que as alterações climáticas potencializam a suscetibilidade da população aos efeitos decorrentes do fenômeno, sobretudo se medidas para enfrentamento do mesmo não forem implementadas (AMBRIZZI; ARAÚJO, 2014). Além disso, o risco de ocorrência de eventos naturais extremos aumenta diante do cenário de alterações climáticas, bem como o risco de eventos singulares de grande escala, ou seja, eventos ainda não conhecidos (AMBRIZZI; ARAÚJO, 2014).

Rosendo et al., (2015) classificam o risco como sendo uma construção eminentemente social na qual todos os fenômenos existentes no globo, sejam eles naturais ou não, só serão representações de perigo se forem agregados a uma sociedade vulnerável, com baixa ou nenhuma resiliência. O autor complementa que embora fenômenos naturais de grande magnitude como terremotos, maremotos, furacões, tsunamis, secas, chuvas extremas e inundações sejam considerados por si só a materialização dos riscos, estes só serão realmente ameaças se atingirem uma comunidade ou um grupo social com pouca ou nenhuma resiliência.

### **2.1.1. Causas e efeitos dos eventos hidrológicos extremos no ambiente urbano**

Os desastres naturais estão entre os problemas mais importantes da sociedade contemporânea, uma vez que os impactos a eles associados podem causar perdas irreparáveis. Entretanto, os desastres naturais estão vinculados à história da humanidade e ao seu modo de apropriação e uso dos recursos naturais e os registros apontam que tais acontecimentos já geraram duros impactos à sociedade desde a formação das primeiras civilizações (MARCELINO, 2008; SOBRAL et al., 2010). Já nos primeiros agrupamentos, constituídos ao longo dos rios, houve a necessidade de se desenvolver técnicas de controle aos impactos de cheias extremos, tais como as práticas de irrigação evidenciadas nos rios Tigre e Eufrates (BRUMES, 2001).

Os desastres naturais podem ser definidos como o resultado de eventos adversos, que causam perturbação ao funcionamento de uma sociedade, podendo causar diversos danos e consequentes prejuízos econômicos, sociais e ambientais. A materialização dos desastres

naturais pode ser registrada de diversas formas, principalmente por meio de eventos extremos de variáveis hidrológicas tais como chuva e vazão (MARCELINO, 2008; TOMINAGA, 2009; SOBRAL et al., 2010).

O impacto de um evento extremo pode ser potencializado levando-se em consideração fatores como a densidade demográfica, ocupação em áreas de risco e planejamento urbano ineficiente. Para uma população crescente os eventos extremos podem provocar impactos nunca antes observados, tendo em vista a vulnerabilidade atual dos ambientes urbanizados (AMBRIZZI; ARAÚJO, 2014). Duarte (2017) acrescenta que as consequências da urbanização não planejada conduzem a precariedade do nível de vida das populações, onde, entre outros efeitos antrópicos, se menciona o aumento na frequência de inundações.

Rosendo et al., (2015) analisando a ocorrência de chuvas intensas e inundações periódicas no município de Cabaceiras – Paraíba, atribuíram a ocorrência dos eventos extremos a fatores tais como presença de solos pouco profundos, com deficiência de drenagem, áreas inundáveis parcialmente impermeabilizadas, cobertura vegetal intensivamente retirada e infraestrutura deficiente em termos de escoamento das águas. Destacando que a população em geral e o poder público encontram-se total ou parcialmente despreparados para este tipo de evento, tornando-se de suma importância o aprofundamento de estudos que possam ajudar a encontrar soluções viáveis que possibilitem a minimização dos riscos encontrados na região.

Oscar Junior (2015), estudando os extremos atmosféricos e desastres hidro meteorológicos em Duque de Caxias/RJ, a partir da análise estatística dos dados diários de pluviosidade (entre 1948 a 1980), não constatou aumento da intensidade das chuvas do município. O autor levantou a hipótese de que a forma como aquele território está organizado e a alteração no complexo de paisagens é a responsável pela ocorrência dos desastres na área de estudo, apontando ainda para uma sensibilidade elevada aos impactos pluviométricos, mesmo aqueles de baixa magnitude.

Campos et al., (2015) ao realizarem uma revisão acerca dos impactos socioeconômicos dos eventos extremos de precipitação diária em Belém-PA, com base em notícias dos jornais da cidade durante o período de 1987 a 2009, constataram que os eventos extremos de precipitação diária causaram desastres físicos, econômicos e sociais devido à falta de infraestrutura da cidade, ocupação urbana desordenada, impermeabilização do solo e falta de rede de drenagem adequada, tendo como principal consequência desses eventos o alagamento, concluindo pela necessidade de um gerenciamento ambiental adequado e educação ambiental para a população.

Loureiro et al., (2014) chegaram a conclusões semelhantes ao analisarem os eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará, resultando em diversos danos, como interrupção do fornecimento de energia elétrica, pontos de alagamento, transbordamento de canais, queda de árvores, prejuízos a comerciantes locais. Os autores concluíram que tais impactos estão fortemente relacionados com a maior exposição da população a riscos diversos, acarretando uma situação de vulnerabilidade cada vez mais recorrente, as quais atingem, principalmente, as populações mais vulneráveis.

Cunha et al., (2014) ao realizarem um estudo sobre a relação chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Araguari-Amapá concluíram que os eventos extremos são cada vez mais frequentes na bacia, com o agravante de que os sistemas controladores ainda são pouco compreendidos. Os autores afirmam que as respostas hidrológicas indicam insuficiência de informações e fragilidade do sistema de monitoramento e de previsão de fenômenos extremos de chuva-vazão, concluindo que eventos extremos são pouco detectáveis e oferecem riscos consideráveis aos usuários da bacia.

Nesse contexto, os eventos hidrológicos extremos, entre eles as inundações urbanas, constituem-se num fenômeno global que causa grande devastação, impactos econômicos e perdas de vidas humanas, pois impõem um sério desafio principalmente às cidades localizadas em países em desenvolvimento e cuja expansão ocorrera de forma rápida (JHA et al., 2012).

Recentemente, inúmeros fenômenos ocorreram ao redor do mundo, ocasionando prejuízos econômicos, ambientais e sociais de grande magnitude, dos quais se destacam os deslizamentos de terra, inundações, alagamentos, furacões, terremotos, incêndios e tempestades.

Segundo o banco mundial de dados de desastres, EM-DAT (International Disaster Database), do centro de pesquisas em epidemiologia dos desastres (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED), em 2018 houve 281 eventos climáticos com mais de 60 milhões de pessoas afetadas em todo o mundo (Tabela 1).

**Tabela 1:** Países com maior quantidade de pessoas afetadas por desastres naturais em 2018.

País	Número de pessoas afetadas
Índia	23.900
Filipinas	6.490
China	6.415
Nigéria	3.938
Guatemala	3.291
Kenya	3.211
Afeganistão	2.206
EUA	1.762
Japão	1.599
Madagascar	1.472

Fonte: EM-DAT (International Disaster Database)

Em 2018, houve uma série de grandes desastres em várias regiões, a Indonésia registrou quase metade do total de mortes por desastres, enquanto a Índia registrou quase a metade do número total de indivíduos afetados. O número de total de mortes registradas foi 10 mil pessoas, conforme é exibido na Tabela 2.

**Tabela 2:** Países que registraram maior número de pessoas mortas por desastres naturais em 2018.

País	Número de mortes no país
Indonésia	4.535
Índia	1.388
Guatemala	427
Japão	419
China	341
Nigéria	300
EUA	298
Paquistão	240
Koreia	237
Filipinas	221

Fonte: EM-DAT (International Disaster Database)

Em janeiro de 2018 fortes tempestades atingiram o estado da Califórnia, nos Estados Unidos, e causaram deslizamentos, inundações e alagamentos. Inúmeros prejuízos foram contabilizados, dentre os quais, a morte de 21 pessoas. Em Santa Bárbara, a região mais afetada, a lama invadiu residências, fechou as estradas e arrastou carros. Este evento ocorreu depois de incêndios terem atingido a região cerca de um mês antes (CARVALHO, 2018).

Em julho de 2018, deslizamentos e enchentes causadas por fortes precipitações atingiram diversas regiões do Japão (Okayama, Higashihiroshima, Mabi, Saka, Kumano). O evento foi considerado como o maior desastre natural registrado naquele país desde o tsunami

registrado no ano de 2011. Inúmeros prejuízos foram contabilizados, dentre os quais, a morte de mais de cem pessoas. As cidades da região receberam entre 300 e 500 mm de chuva em apenas duas horas – uma vez e meia o esperado para o mês inteiro (CARVALHO, 2018).

No mês de agosto de 2018, ocorreram fortes inundações da Índia, ocasionadas por chuvas de monções, características da região, as quais deixaram cerca de 360 mortos e mais de 200.000 desabrigados. O Estado de Kerala foi a região mais atingida e os prejuízos econômicos foram estimados em 3 bilhões de dólares (CARVALHO, 2018).

Em setembro de 2018, a Nigéria declarou “calamidade nacional” em função das inundações que castigaram o país deixando cerca de 250 mortos. As fortes chuvas que afetaram 12 Estados da Nigéria, ocasionaram o transbordamento de rios. Aproximadamente 176.000 pessoas ficaram desabrigadas em vários estados (CARVALHO, 2018).

Também no mês de setembro de 2018, os estados Carolina do Norte e Carolina do Sul, localizados na costa leste dos estados Unidos, foram atingidos pelo furacão Florence, resultando em fortes chuvas, inundações e tornados. O evento causou a morte de 53 pessoas, entre outros prejuízos materiais (CARVALHO, 2018).

No Brasil, de acordo com dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres, 64 municípios brasileiros registraram situação de emergência durante o ano de 2018, decorrentes de impactos relacionados a eventos hidrológicos. Desse total, a região Norte apresentou o maior número de municípios atingidos, totalizando 31, que corresponde a 6,88% do número total de municípios da região. Somente o Estado do Pará, apresentou quase 50% do total da região, seguido pelos Estados do Tocantins e Amazonas, conforme exhibe a Tabela 3.

**Tabela 3:** Registro da quantidade de municípios em situação de emergência no período de janeiro a dezembro de 2018, reconhecida pelo Governo Federal, decorrentes de eventos hidrológicos (alagamentos e inundações), por Estado.

<b>Região/Unidade da Federação</b>	<b>Total de municípios</b>	<b>Total de municípios que decretaram emergência (2018)</b>	<b>%</b>
<b>Norte</b>	<b>450</b>	<b>31</b>	<b>6,88</b>
Acre	22	0	0
Amazonas	62	5	8,06
Amapá	16	1	6,25
Pará	144	15	10,41
Rondônia	52	1	1,92
Roraima	15	1	6,66
Tocantins	139	8	5,75
<b>Nordeste</b>	<b>1794</b>	<b>15</b>	<b>0,83</b>
Maranhão	217	9	4,14
Piauí	224	2	0,89
Ceará	184	2	1,08
Rio Grande do Norte	167	0	0
Paraíba	223	0	0
Pernambuco	185	0	0
Alagoas	102	0	0
Sergipe	75	0	0
Bahia	417	2	0,47
<b>Sudeste</b>	<b>1668</b>	<b>12</b>	<b>0,71</b>
Minas Gerais	853	9	1,05
Espírito Santo	78	1	1,28
Rio de Janeiro	92	0	0
São Paulo	645	2	0,31
<b>Sul</b>	<b>1191</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Paraná	399	0	0
Santa Catarina	295	0	0
Rio Grande do Sul	497	0	0
<b>Centro-Oeste</b>	<b>467</b>	<b>6</b>	<b>1,28</b>
Mato Grosso do Sul	79	2	2,53
Mato Grosso	141	1	0,7
Goiás	246	3	1,21
Distrito Federal	1	0	0
	<b>5570</b>	<b>64</b>	<b>1,14</b>

Fonte: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

### **2.1.2. A cidade de Rio Branco e seu histórico de eventos hidrológicos extremos**

A cidade de Rio Branco foi fundada em 28 de dezembro de 1882, quando o Seringal Volta da “Empresa” foi fundado na margem direita do rio Acre, pelo cearense Neutel Maia (RIO BRANCO, 2013). Estudiosos definem pelo menos três fases distintas na história da cidade (RIO BRANCO, 2013), a saber:

- ✓ 1ª Fase – 1882/1898 – quando o Seringal se torna um povoado e se consolida comercialmente na região;
- ✓ 2ª Fase – 1899/1903 – na qual os acontecimentos da Revolução Acreana levam a Volta da “Empresa” a se tornar o centro do poder político no vale do rio Acre;
- ✓ 3ª Fase 1904/1908 – quando a denominada “Villa” Rio Branco consolida sua liderança política e econômica tornando-se a sede do Departamento do Alto Acre.

Foi no fim do período compreendido entre os anos de 1941 e 1970, que Rio Branco desenvolveu algumas das principais características de núcleo urbano, graças à instalação de equipamentos pelo governo territorial, tornando-se polo de atração urbana para as populações rurais.

Atualmente, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população estimada de Rio Branco para 2019 ultrapassa 400 mil habitantes, sendo que 92% de sua população ocupa a área urbana. Muito embora a área urbana do município seja pequena em relação ao seu território, a cidade concentra metade da população do estado do Acre, o que lhe atribui elevada densidade demográfica (38,03 hab/km<sup>2</sup>).

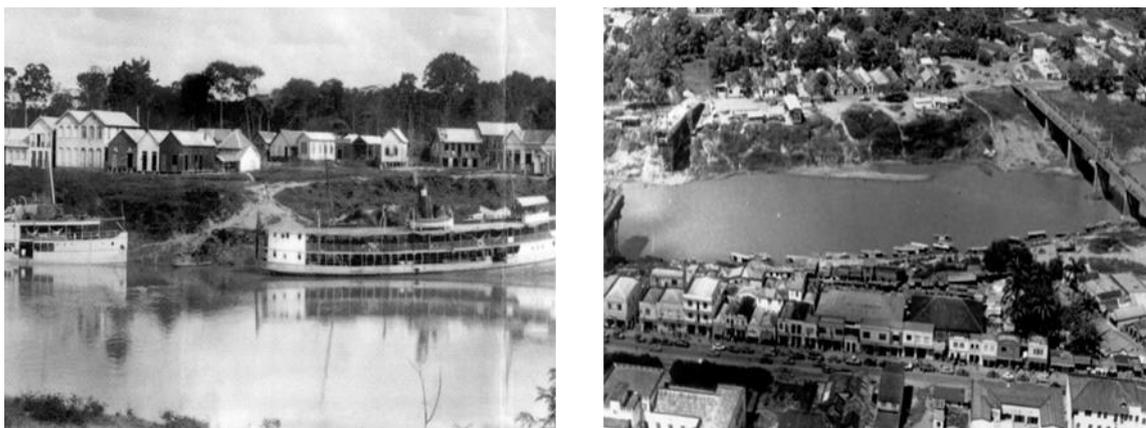
Esse crescimento populacional, conjugado com uma elevada densidade demográfica acarreta problemas de mobilidade urbana, saneamento, ocupação de áreas de preservação permanentes (APP), dentre outros problemas ambientais e infraestrutura social e urbana deficitária. No que se refere aos aspectos econômicos, o Produto Interno Bruto do Município de Rio Branco em 2011 era de R\$ 5,5 bilhões. Em 2016, último dado divulgado pelo IBGE, saltou para R\$ 8,1 bilhões. O setor de serviços representa um percentual significativo da economia do Município.

A bacia hidrográfica do Rio Acre, ocupa a parte leste do Estado do Acre. Além da capital outros cinco municípios estão localizados às margens do rio Acre (Assis Brasil, Brasileia, Epitaciolândia, Xapuri, Porto Acre), de forma que mais de 450 mil pessoas ocupam a referida bacia e, muitas delas em situação de vulnerabilidade ambiental (DUARTE, 2017).

O município de Rio Branco, capital do Acre, a exemplo de muitas outras cidades da Amazônia e de diversas regiões do mundo (DUARTE, 2017), teve seu processo de urbanização

originado em torno dos cursos d'água, nos quais diversos bairros se estabeleceram, bem como o centro comercial e de serviços.

A área urbana da cidade se originou a partir de uma estreita faixa de terra na margem direita do rio Acre, situada diante da árvore gameleira que serviu como referência para a construção de uma série de outros prédios seguindo o traçado da margem do rio. Formou-se, assim, um primeiro arruamento onde se estabeleceram hotéis, restaurantes, casas comerciais e residenciais (RIO BRANCO, 2013).



**Figura 1:** Registro fotográfico da cidade de Rio Branco, em 1910 (lado esquerdo) e na década de 1970 (lado direito).

Além disso, um número expressivo de bairros foi originado a partir de ocupações desordenadas e sem as condições necessárias de infraestrutura, além de situados na planície de inundação (conhecida na região como área alagável) e outras áreas de risco, ou mesmo a partir de loteamentos clandestinos e conjuntos residenciais mal projetados e/ou implantados, o que torna um desafio ao ordenamento deste território (RIO BRANCO, 2013).

Portanto, ao longo do período de formação da área urbana de Rio Branco, pode-se observar características que favorecem a ocorrência de eventos que causam danos materiais e ambientais, em função da consolidação das ocupações nas áreas de preservação permanente, leitos e encostas do rio e do uso desordenado do solo na região, aliado a intensa impermeabilização.

Em função destas características, Rio Branco tem vivenciado sistematicamente inundações e alagamentos que geram inúmeros prejuízos sociais, ambientais e econômicos. De acordo com Jha et al., (2012) a inundação urbana impõe um sério desafio, particularmente aos habitantes de cidades em acelerado processo de expansão em países em desenvolvimento, como é o caso de Rio Branco. Segundo os autores, a inundação é um fenômeno global que causa grandes danos, prejuízos econômicos e mortes, principalmente de populações vulneráveis.

Duarte (2006), destacou que cidades amazônidas, a exemplo de Rio Branco, sofrem os impactos de cheias ocasionadas pelas variabilidades climáticas interanuais. Destaca ainda, que conforme a população cresce, deve-se considerar, também, a deficiência na infraestrutura, e em número de desabrigados, bem como as consequências em termos de falta de bem-estar e de saúde, embora, segundo o autor, esta situação seja evitável.

A exemplo disso, todos os anos a cidade de Rio Branco é atingida, em menor ou maior amplitude, pelo fenômeno da enchente. No período chuvoso que compreende os meses de novembro a abril, a região é castigada por fortes precipitações pluviométricas. Aliado a isso, a hidrografia da região, que é extensa, também contribui bastante para a ocorrência do fenômeno (RIO BRANCO, 2019). Adicionalmente, outro fator responsável pela ocorrência das enchentes em Rio Branco são as chuvas que ocorrem à montante de sua localização geográfica (SANTOS, 2013).

Por se tratar de um fenômeno frequente na região, as enchentes e consequentes inundações transformaram-se num problema histórico-social-ambiental, que ao longo dos tempos, vem acarretando grandes prejuízos econômicos e sociais ao estado do Acre, principalmente na capital, onde há maior adensamento e concentração de pessoas em vulnerabilidade ambiental (RIO BRANCO, 2017).

Segundo dados do Plano de Contingência Operacional de Enchentes 2019 para a cidade de Rio Branco é possível observar que, nos últimos 48 anos, em apenas em 11 (onze) deles não ocorreram inundações, representando 22,9% do total analisado. Por outro lado, em 77,1% (37 anos), ocorreram inundações categorizadas em pequena, média, grande ou extraordinária, com maior concentração nos meses de fevereiro e março. A série história referente ao plano mencionado encontra-se no APÊNDICE .

A inundação registrada no rio Acre, em 1988, atingiu cerca de 18 mil pessoas e desabrigou cerca de 6,2 mil pessoas na cidade de Rio Branco. Estima-se que os prejuízos econômicos ultrapassaram R\$ 184 milhões. Foram decretadas Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública (RIO BRANCO, 2019).

No ano de 1997, ocorreu uma das maiores inundações registradas em Rio Branco na qual o rio permaneceu mais de 30 dias acima da cota de alerta. Foram decretadas Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública. O número total de pessoas atingidas superou 20 mil e o número de desabrigados chegou a 7 mil pessoas. Os prejuízos econômicos chegaram a quase R\$ 68 milhões (RIO BRANCO, 2019).

Em 2012, a inundação quase superou 1997 no tocante à cota registrada, que chegou a 17,64 m. A inundação atingiu cerca de 65 mil pessoas e desabrigou 8 mil, tendo os prejuízos econômicos estimados em R\$ 200 milhões, (RIO BRANCO, 2019).

Além disto, em 2014 o transbordamento do rio Madeira, em Rondônia, trouxe elevados prejuízos não somente a Rio Branco, mas a diversos municípios do Acre. O rio madeira alcançou a cota máxima de 19,72 m, causando interdição da BR-364 que liga o Acre aos demais estados da Federação. O isolamento causou sérios problemas de abastecimento para a região do Acre, tendo em vista que trechos da estrada ficaram submersos, impossibilitando o tráfego de todo tipo de veículo (CEPED, 2015).

Já no ano seguinte, ocorreu a maior inundação registrada em Rio Branco, quando marcou a cota de 18,40 m. O evento atingiu cerca de 100 mil pessoas e desabrigou outras 10 mil. Os prejuízos econômicos foram estimados entre 200 e 600 milhões de reais.

Segundo dados da Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2016), o quantitativo pluviométrico acumulado em Rio Branco, no mês de fevereiro de 2015 foi de 291,40 mm. O Boletim Climático da Amazônia – Sipam indicou chuvas acima dos padrões climatológicos e o modelo hidroestimador de precipitação acumulada do CPTEC/INPE registrou chuvas abundantes em toda a bacia do Rio Acre. Assis Brasil, Brasileia, Epitaciolândia, e Xapuri, na região de fronteira com o Peru (nascente do Rio Acre) e Bolívia, apresentaram respectivamente 454 mm, 299,4mm; 254 mm e 252,8 mm de chuvas acumuladas em fevereiro (RIO BRANCO, 2019).

De acordo com informações da Prefeitura de Rio Branco, com o registro da cota máxima de 18,40 metros, estima-se que 29.300 residências foram atingidas pelas águas e 100 mil pessoas alcançadas em pelo menos cinquenta e três bairros da capital, além da zona rural.

No que concerne aos prejuízos de infraestrutura, além das residências, 13 Unidades de Saúde e 15 Escolas da Rede Pública Municipal foram atingidas pelo transbordamento do rio Acre, comprometendo o atendimento básico de saúde, e o início do ano letivo daquele ano.

O município de Rio Branco decretou, em 23 de fevereiro de 2015 Situação de Emergência por meio do Decreto nº 193/2015. Em seguida, o Decreto nº 201 de 25 de fevereiro, ampliou as áreas afetadas pela ocorrência da inundação. Destarte, a situação continuou progredindo, com a ampliação de número de famílias atingidas e dos impactos ao sistema de transporte, saúde pública e segurança. Esgotando-se a capacidade do município em arcar com os danos decorrentes deste evento, foi decretado o Estado de Calamidade Pública, através do Decreto nº 214/2015 de 01 de março, o qual foi reconhecido pela União através da Portaria nº

22, de 04 de março de 2015, da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), órgão do Ministério da Integração Nacional (RIO BRANCO, 2019).

## **2.2. TENDÊNCIAS TEMPORAIS E ALTERAÇÕES NOS PADRÕES HIDROLÓGICOS**

A detecção de mudanças temporais em séries hidrológicas é muito importante tanto do ponto de vista científico quanto prático. Tais alterações, advindas de ações antrópicas ou não, são fundamentais para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos (SOUZA et al., 2015). De acordo com Uliana et al., (2015), a verificação de tendências é uma importante ferramenta para muitas aplicações na hidrologia, pois além de analisar o comportamento temporal de tais variáveis é também importante instrumento de verificação sobre a presença de não-estacionariedade em uma série temporal.

A análise de tendências ou saltos em séries de vazão é de extrema importância, pois muitos dos sistemas hídricos são projetados e operados a partir da hipótese de estacionariedade estatística das séries analisadas. Entretanto, essa hipótese nem sempre é verificada e isso pode impactar, sobretudo, na gestão e manejo das bacias hidrográficas (MOREIRA; NAGHETTINI, 2016; SANTOS et al., 2016).

É importante notar que a não-estacionariedade em uma série temporal hidrológica é uma mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma determinada amostra, excluindo-se as mudanças periódicas ou quase periódicas de tal definição. Aos tipos de não-estacionariedade incluem-se tendências, saltos ou ciclos ao longo do tempo (NAGHETTINI; PINTO, 2007; SILVA;SOUZA, 2013).

Existem muitas técnicas demasiadamente utilizadas para a verificação de não-estacionariedade em séries de variáveis hidrológicas, incluídos os testes paramétricos e não-paramétricos, cujo destaque é dado às ferramentas estatísticas essencialmente concebidas para esse fim, a exemplo do teste de Mann-Kendall, do teste de Spearman e do teste de Pettitt (SHADMANI et al., 2012). Os testes incluídos neste contexto e utilizados no presente estudo serão apresentados mais adiante, onde serão expostos a forma de determinação da estatística de teste, além da regra de decisão sobre as hipóteses estabelecidas.

As alterações temporais verificadas nas variáveis hidrológicas, seja em razão da variabilidade natural do clima e/ou de ações antrópicas podem ocasionar diversos problemas, entre eles a interferência no planejamento e operação de infraestruturas hídricas e/ou

hidráulicas, já que seu dimensionamento é realizado considerando que as estatísticas das séries observadas permaneçam constantes ao longo do tempo (ANA, 2010).

São diversos os fatores que podem ser considerados como causas prováveis de séries não-estacionárias, relacionados às atividades antrópicas, além dos fatores relacionados a variabilidade natural, cuja ação pode ser conjunta ou isoladamente. A Agência Nacional de Águas (ANA), elenca alguns fatores de natureza antrópica:

- alterações no uso do solo, como desmatamento e uso de diferentes práticas agrícolas;
- construção de reservatórios de diferentes portes à montante, nas bacias hidrográficas;
- incoerências nos registros hidrológicos ao longo da escala temporal, seja por medida e/ou por alteração no leito do rio, na seção de medição;
- retirada de água para a utilização em diversas atividades humanas.

As perturbações no regime hidrológico podem impor mudanças consideráveis em diversos segmentos, especialmente para navegação, irrigação, abastecimento de água, controle de inundação e principalmente na geração de energia, uma vez que a energia hidrelétrica é preponderante no país (ANA, 2010).

Deste modo, estudos relacionados à análise de tendências e não-estacionariedades em séries hidrológicas e/ou climáticas é de fundamental importância num cenário de possíveis alterações climáticas, sendo de extrema relevância para as cidades planejarem suas estruturas com base no comportamento hídrico, racionalmente eficiente (ANA, 2010).

A partir desse propósito, muitos estudos já foram realizados, cujas conclusões auxiliam na tomada de decisões ou são basais para argumentar hipóteses futuras sobre o comportamento hidrológico, seja em escala regional ou global. Neste sentido, é valorosa a contribuição de Bard et al., (2015), cujos resultados contribuem para compreender a evolução temporal do regime hidrológico na região dos Alpes. Os autores verificaram tendências temporais consistentes no regime hidrológico da região e sugerem que estas podem estar relacionadas com a variabilidade climática, e não em consequência de falhas nos registros ou advindas de influências antrópicas diretas. No entanto, os autores sugerem a realização de estudos futuros para confirmar tal verificação.

Nesse viés, Ogiramo et al., (2013) sugerem como parte de suas conclusões que a variabilidade observada nos extremos de chuva e temperatura na bacia hidrográfica do Lago Vitória se devem à influências oceânicas, pois o comportamento climático atuante nos oceanos Índico e Atlântico influenciam nas tendências cíclicas observadas nos extremos hidro

meteorológicos na referida bacia. Destaca-se que a bacia hidrográfica do Lago Vitória é a maior massa de água doce da África.

Por sua vez Ely e Dubreuil (2017), analisaram possíveis tendências espaço-temporais das precipitações totais anuais para o estado do Paraná e concluíram pela rejeição da hipótese de tendência significativa para os registros. Os autores recomendam atenção especial, sobretudo dos órgãos de planejamento e controle, tendo em vista que as localidades que apresentam considerável umidade apresentaram um aporte em suas precipitações anuais, o que poderá acarretar impactos sobre as bacias, tais como inundações e alagamentos nas áreas urbanas. Já para as áreas onde verificou-se tendências à redução nos totais de precipitação, embora não sendo significativas, requerem uma análise minuciosa para a identificação dos pontos de mudança onde se manifestaram tais reduções, haja vista o risco de afetar substancialmente a economia da região, baseada na atividade agrícola.

No estado do Acre, Moreira et al., (2016a), estudaram o comportamento temporal dos registros de precipitação em Cruzeiro do Sul, cujos resultados evidenciaram leve tendência temporal ascendente, porém não significativa. Os autores destacam a importância do referido estudo para auxílio no planejamento e gestão dos recursos hídricos disponíveis, uma vez que o conhecimento da variabilidade temporal das chuvas é fator preponderante para o controle e gerenciamento desses recursos da região.

Portanto, está evidente que não existe consenso sobre as causas referentes às alterações registradas nos padrões climáticos. O fato é que, tanto por parte da comunidade científica quanto de outras organizações que estudam o tema, há relatos de evidentes alterações nos registros recentes, causando múltiplos impactos à sociedade e ao ambiente, sobretudo no tocante às variáveis hidrológicas, que são mais sensíveis. Além disso, estima-se que os impactos de tais alterações serão sentidos mais fortemente no futuro e podem causar elevados danos.

### **2.3. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E RISCO EM SÉRIES HIDROLÓGICAS**

As variáveis hidrológicas, tais como as precipitações e as vazões dos cursos d'água, estão entre as principais variáveis hidrológicas. Através de metodologias desenvolvidas com vistas à tomada de decisão para a gestão dos impactos decorrentes de suas ocorrências, pode-se elucidar grande parte da dinâmica envolvida nos processos hidrológicos e, com isso, auxiliar na solução de diversos problemas associados a eventos extremos (NEGRÃO et al., 2013).

Entretanto, as incertezas envolvidas nos referidos processos devem ser devidamente consideradas, uma vez que as variáveis hidrológicas apresentam acentuado grau de

aleatoriedade na dinâmica de suas ocorrências, que se propagam ao longo da escala temporal e espacial. Com isso, os estudos sobre o comportamento de suas ocorrências, bem como a magnitude, sujeitam-se a soluções propostas pela teoria da probabilidade e estatística matemática (FAN et al., 2015; MOREIRA, 2016).

De fato, dada a aleatoriedade envolvida na ocorrência de fenômenos hidrológicos, os métodos estatísticos são verdadeiramente importantes. Neste sentido, Negrão et al., (2013) ponderam que os modelos probabilísticos consideram a aleatoriedade presente na ocorrência de tais fenômenos e servem como ferramentas para a análise de cenários pretéritos e construção de modelos atribuídos a possíveis cenários futuros. Nessa conformidade, a análise de frequência é um dos métodos estocásticos mais utilizados pela ciência hidrológica e se destina, basicamente, a extrair inferências populacionais no tocante à probabilidade associada a uma determinada variável hidrológica a partir de um conjunto amostral registrado (KATZ et al., 2002; MOREIRA et al., 2016a).

De acordo com Quadros et al., (2011); Lanna (2012); Fan et al., (2015), os modelos que incorporam as incertezas na tomada de decisão sobre cenários futuros no âmbito da ciência hidrológica avançaram bastante nas últimas décadas e suas aplicações tem demonstrado muitos benefícios, sobretudo no âmbito da engenharia hidrológica, em que a estimativa da probabilidade de eventos adversos é fundamental. Todavia, Fan et al., (2015) destacam que a maioria dos trabalhos que envolvem previsões hidrológicas probabilísticas se concentram na Europa, América do Norte, China e Austrália. Os autores destacam que, no Brasil e na América do Sul em geral, as pesquisas nesse viés podem ser inseridas em classificação de estágio inicial. Além disso, reportam que os esforços preliminares na geração de previsões hidrológicas em bacias hidrográficas brasileiras apresentaram, de maneira geral, resultados positivos.

É trivial que a magnitude de eventos naturais extremos é proporcionalmente inversa à frequência de ocorrência, aqui incluídos os eventos hidrológicos. De fato, esse pressuposto basilar da análise de frequência encontra amparo em muitos estudos (PAPALEXIOU; KOUTSOYIANNIS, 2013; SANTOS et al., 2013; OBEYSEKERA; SALAS, 2014; DU et al., 2015;). Já Nunes (2018) subscreve tal afirmação e acrescenta que o objetivo da análise de frequência das variáveis hidrológicas é relacionar a magnitude dos eventos à sua frequência de ocorrência por meio de uma distribuição de probabilidades.

Por sua vez, Moreira (2016) acrescenta que os resultados obtidos por meio da análise de frequência de variáveis hidrológicas são fundamentais para a solução de inúmeros problemas,

especialmente para o planejamento e construção de medidas de controle dos impactos relacionados a esses fenômenos.

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), a análise de frequência pode ser classificada como local ou regional, que se dá de acordo com extensão espacial das informações envolvidas. Na análise local, os valores da variável em análise associados a certas probabilidades de excedência se referem a uma única série de registros; já na análise de frequência regional, utiliza-se as informações registradas em vários postos, localizados em uma região preliminarmente considerada como homogênea.

Destaca-se que o trabalho em evidência focou na análise de frequência local. Apesar disso, a análise de frequência regional é sabidamente importante, especialmente porque as informações podem ser agrupadas em subconjuntos que possuem características fisiográficas, climáticas e estatísticas como elemento de interseção.

Nunes (2018) destaca que a modelagem probabilística das variáveis hidrológicas pode ser acobertada por meio de duas abordagens gerais: a primeira (que será utilizada no presente estudo) utiliza série temporal de valores máximos; e a segunda utiliza as chamadas séries de duração parcial, também denominadas de séries de picos acima de um limiar, do termo em inglês *peaks-over-threshold* (NOORTWIJK et al., 2007).

De acordo com Moreira (2016), a análise de frequência considera como pressuposto fundamental que as séries amostrais de observações sejam independentes e identicamente distribuídas, ou seja, que sejam representativas (não apresentem erros de observação) e que sejam homogêneas. É, também, pressuposto fundamental da análise de frequência que a série seja considerada estacionária, isto é, supõe-se não haver mudanças nas características estatísticas ao longo do tempo. Entre tais características estão incluídos os valores dos parâmetros das distribuições resultantes da teoria clássica de valores extremos, a exemplo da distribuição de Gumbel, que será abordada oportunamente adiante (MOREIRA et al., 2016b).

Entretanto, por efeito da interferência de diversos fatores sobre a dinâmica dos processos hidrológicos, a premissa de estacionariedade nem sempre é verificada (MOREIRA et al., 2016b). Embora o tema ultrapasse os limites do planejamento proposto por esse trabalho, convém destacar que a não-estacionariedade em uma série temporal hidrológica é uma mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma determinada amostra, excluindo-se as mudanças periódicas ou quase periódicas de tal definição. Aos tipos de não-estacionariedade incluem-se tendências, saltos ou ciclos ao longo do tempo (NAGHETTINI; PINTO, 2007; SILVA; SOUZA, 2013). Diversos estudos foram realizados sobre a não-estacionariedade e os

modelos estatísticos concebidos sob esse viés, especialmente os que foram desenvolvidos por Papalexiou e Koutsoyiannis (2013); Obeysekera e Salas (2014); DU et al., (2015); Moreira et al., (2016b); Moreira (2016).

Do ponto de vista estacionário, Naghettini e Pinto (2007) relacionam as etapas fundamentais para a análise de frequência de variáveis hidrológicas, descrito por Moreira (2016), como a seguir:

- Avaliar os dados das séries no tocante à homogeneidade, representatividade e independência;
- Propor, a priori, uma ou mais distribuições de probabilidades, seguida da estimativa de seus parâmetros, quantis e intervalos de confiança e, depois, verificar a aderência à distribuição empírica;
- Identificar eventuais pontos atípicos, com repetição de algumas etapas precedentes;
- Selecionar o modelo distributivo apropriado à situação tendo, evidentemente, parcimônia.

A análise de frequência pode ser realizada por meio de duas técnicas: de modo analítico ou por meio de papéis de probabilidades. Na análise por meio de papéis de probabilidades, deve-se plotar a função acumulada de probabilidades da distribuição adotada em papéis em gráficos ajustados para que a relação entre a função acumulada de probabilidades e os valores da variável seja linearizada. Por outro lado, na análise de frequência analítica o intuito é determinar a distribuição que melhor caracteriza as propriedades que descreve a população analisada a partir de dados observados e estimar os quantis associados à probabilidade desejada (LIMA, 2014; MOREIRA, 2016).

No tocante à modelagem de valores máximos ou mínimos associados a variáveis hidrológicas, existe um conjunto de distribuições que pode ser utilizado, com destaque aos modelos resguardados pela teoria clássica de valores extremos, que inclui as distribuições de Gumbel, Fréchet, Weibull e a Generalizada de Valores Extremos (GEV). É importante lembrar, evidentemente, das distribuições conhecidas como não extremas que inclui a Generalizada de Pareto, Pearson III, Log-Pearson e Log-Normal de dois parâmetros (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A definição do modelo distributivo requer a estimação dos parâmetros que melhor caracterize a população representada pela amostra analisada e, para tanto, há uma variedade de métodos. No presente trabalho é destacado o Método da Máxima Verossimilhança (MVS). Neste sentido vale destacar a visão de Paiva et al., (2008), que a definição de um modelo

distributivo associado a determinada variável natural, especialmente os modelos hidrológicos, deve auxiliar na compreensão dos fenômenos relacionados e ter capacidade preditiva.

De acordo com Clarke (2012), é importante ter parcimônia na construção de um modelo estatístico. O autor destaca que um princípio fundamental para a construção de modelos probabilísticos, tanto em hidrologia quanto em outras ciências, é utilizar o menor número de parâmetros possíveis e que sejam capazes de descrever adequadamente as características das observações no ajuste de uma distribuição teórica a uma distribuição empírica. Por isso, a distribuição de Gumbel é demasiadamente utilizada em estudos destinados a analisar o comportamento e a magnitude de valores máximos (ou mínimos) de variáveis hidrológicas.

A seguir descreve-se o método destacado neste trabalho (COLES, 2001; MOREIRA, 2016):

### 2.3.1. Método da Máxima Verossimilhança (MVS)

Basicamente, o método busca maximizar uma função dos parâmetros da distribuição, a qual se atribui o nome de função de verossimilhança. Segundo Moreira (2016), é tido como um método flexível para a determinação dos parâmetros de uma distribuição de probabilidades.

Segundo Coles (2001), considere-se uma amostra aleatória simples  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , extraída de uma população cuja função densidade de probabilidades é expressa por  $f_X(x|\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ , com  $k$  parâmetros. Considerando-se ainda que os elementos  $X_1, X_2, \dots, X_n$  sejam independentes e identicamente distribuídos, a função densidade de probabilidades conjuntas desses elementos, denominada função de verossimilhança, pode ser expressa da seguinte forma:

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^N f_X(x_i|\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (2.1)$$

A busca da condição de máximo para a função de verossimilhança resulta no seguinte sistema, composto de  $k$  equações e  $k$  incógnitas, cuja solução apresenta os estimadores de máxima verossimilhança.

$$\frac{\partial L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)}{\partial \theta_j} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.2)$$

Em muitos casos, é mais conveniente trabalhar com a função de log-verossimilhança, expressa por:

$$\ell(\theta) = \log L(\theta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i; \theta_k) \quad (2.3)$$

A justificativa para o ajuste apresentado se dá porque a função logarítmica resultante é contínua, monótona e crescente e, por conseguinte, maximizar o logaritmo da função é o mesmo que maximizar a função.

Como destacado, existe uma variedade de métodos para estimação dos parâmetros de uma distribuição de probabilidades disponíveis na literatura, os quais podem despertar interesse do leitor. Para tanto, deve-se recorrer às referências relacionadas, especialmente em Coles, 2001; Naghettini; Pinto, 2007 e Clarke, 2012.

Convém destacar que, depois de realizada a estimativa dos parâmetros e da definição da distribuição de probabilidades que melhor representa os dados analisados, deve-se verificar a aderência à distribuição empírica dos dados, cujos testes mais conhecidos são: Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Filliben, Qui-quadrado, etc. (COLES, 2001).

### 2.3.2. Tempo de retorno e risco hidrológico

O tempo de retorno e o risco hidrológico são dois conceitos importantes tanto para as ciências hidrológicas como para outras áreas do conhecimento. São demasiadamente utilizados em estudos de análise de frequência e suas definições estão relacionadas à probabilidade de um determinado evento de referência (CHOW et al., 1988; SALAS; OBEYSEKERA, 2014).

O tempo de retorno, comumente representado por  $T$ , não se refere ao tempo cronológico, mas a uma medida de tendência central do tempo cronológico, o qual é denominado de tempo de recorrência. Conforme definido por Naghettini e Pinto (2007), o tempo de retorno corresponde ao tempo médio necessário (anos) para que um determinado evento recorra, em um ano qualquer. Matematicamente, o tempo de retorno é o inverso da probabilidade de que um evento de referência  $x_T$  recorra, ou seja:

$$T(x_T) = \frac{1}{P(X > x_T)} = \frac{1}{1 - F_X(x_T)} \quad (2.4)$$

sendo  $F_X(x_T)$  a probabilidade de não excedência associada a determinado evento. Daí, verifica-se que:

$$F_X(x_T) = 1 - \frac{1}{T(x_T)} \quad (2.5)$$

A partir do conceito de tempo de retorno, pode-se definir o risco hidrológico associado a um quantil de referência  $x_T$ , sendo, portanto, um importante desdobramento de tal conceito.

Segundo Moreira (2016), o risco hidrológico apresenta notória relevância no planejamento de ações de controle dos impactos de eventos extremos.

Conforme descrito por Salas e Obeysekera (2014); Moreira (2016), o risco hidrológico é definido como a probabilidade de que um quantil de referência  $x_T$  seja igualado ou superado, ao menos uma vez, ao longo de um período de N anos. Denotado por R, pode ser assim descrito:

$$R = P(X \geq x_T) = 1 - P(X < x_T) = 1 - [F_X(x_T)]^N \quad (2.6)$$

Daí, substituindo o valor da Equação (2.5 tem-se:

$$R = 1 - \left[1 - \frac{1}{T(x_T)}\right]^N \quad (2.7)$$

Os conceitos de tempo de retorno e risco hidrológico também estão sujeitos a objeções quanto à sua aplicabilidade em um contexto de não-estacionariedade e, como já foi mencionado, não é o foco do presente estudo. Entretanto, é um tema bastante recorrente nas últimas décadas, e deve certamente despertar interesse, especialmente no contexto atual, que muito se discute sobre possíveis alterações nos padrões climáticos e suas consequências, especialmente sobre os fenômenos hidrológicos. Por isso, a recomendação anteriormente posta sobre as referências nessa obliquidade é efetivamente válida.

### **3. OBJETIVOS**

#### **Geral**

Avaliar o risco hidrológico associado a eventos extremos na cidade de Rio Branco-AC, com base no estudo do comportamento temporal das vazões e precipitações pluviométrica diárias máximas anual.

#### **Específicos**

- ✓ Verificar a consistência das séries pluviométricas e fluviométricas da área de estudo;
- ✓ Discutir e comparar possíveis tendências temporais nas séries analisadas;
- ✓ Identificar a distribuição que melhor se ajusta aos dados;
- ✓ Comparar os quantis estimados de chuva e de vazão com os valores obtidos em outras regiões.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

#### A CIDADE DE RIO BRANCO – ACRE

O município de Rio Branco é a capital do estado do Acre, localizado na região Norte do Brasil, na área de abrangência da Amazônia Legal. O estado é o décimo quinto em extensão territorial, com uma superfície de 164.123 km<sup>2</sup>, correspondente a 4,26% da Região Norte e a 1,92% do território nacional. Tem os seus limites formados por fronteiras internacionais com Peru (O) e Bolívia (S) e por divisas estaduais com os estados do Amazonas (N) e Rondônia (L) (IBGE, 2017).

O município de Rio Branco, por sua vez, tem uma área de aproximadamente 8.834 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 401.155 habitantes conduzindo para a densidade demográfica de 38,03 hab./km<sup>2</sup>. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) é de 0,727, considerado médio/alto. A medida do IDHM é composta de indicadores de três dimensões do desenvolvimento humano: longevidade, educação e renda (IBGE, 2017).

O clima de Rio Branco é do tipo equatorial quente e úmido, caracterizado por altas temperaturas. A média anual de pluviosidade é próxima de 2.000 mm, e a umidade relativa do ar fica em torno de 80%. A unidade geotectônica da cidade é a Bacia do Acre, da formação de Solimões e de idade cenozóica, caracterizada principalmente por material sedimentar pouco consolidado. A depressão de Rio Branco (entre 140m e 270m de altitude) abrange a maioria das terras do município juntamente com a unidade depressão do Iaco-Acre (entre 160m e 290m de altitude) (FARIAS et al., 2018).

Os solos da região são predominantemente da classe dos Argissolos, mas, há alguns fragmentos de Plintossolo e Luvisolo. Devido à influência sub andina nos solos do município de Rio Branco a capacidade de armazenamento de água se mostra insuficiente para a manutenção de um regime hídrico homogêneo (CARMO;LATUF, 2008).

A cidade está localizada às margens do rio Acre, que é um afluente do rio Purus que, por sua vez, é tributário do rio Amazonas. A rede fluvial do rio Acre tem a montante na fronteira entre a Bolívia, o Brasil e o Peru e a jusante no rio Purus, na cidade de Boca do Acre - AM. A rede é formada pelo rio principal de nome homônimo e pelos seus principais afluentes da margem esquerda: Xapuri, Riozinho do Rola, Andirá e Antimari, além de afluentes menores como os igarapés São Francisco (margem esquerda) e Judia (margem direita) que cruzam a

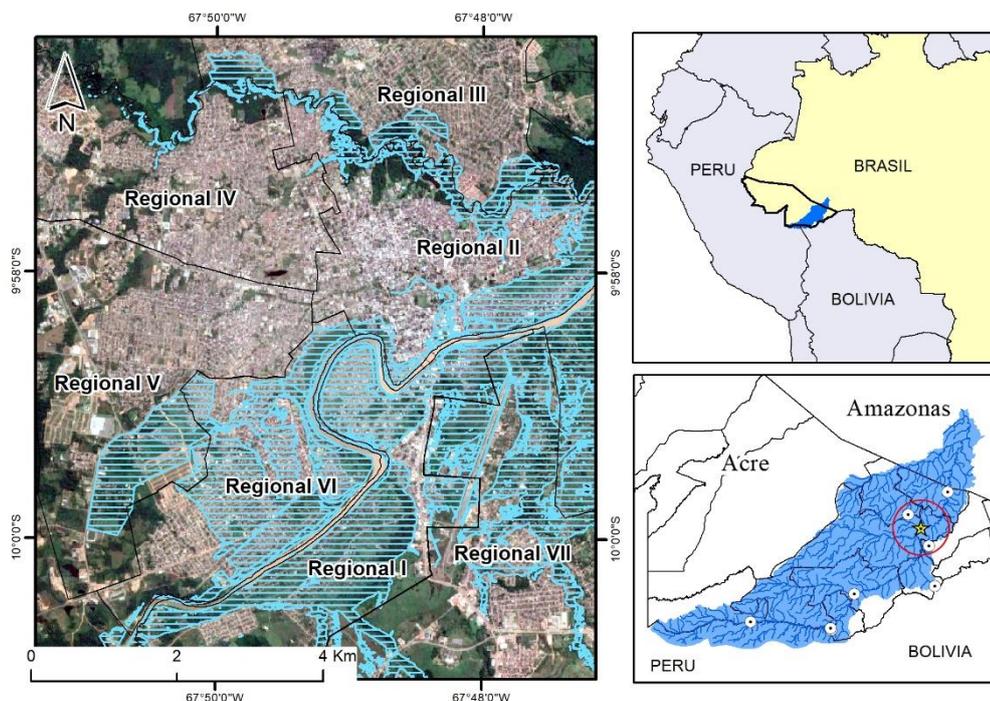
cidade de Rio Branco e juntamente com o rio Acre são os responsáveis pelas enchentes mais severas registradas na cidade (DUARTE, 2006).

#### 4.2. SÉRIES HIDROLÓGICAS

O presente estudo tem como base os dados de precipitação pluviométrica da estação meteorológica 82915, localizada no município de Rio Branco ( $9,96^{\circ}$  S;  $67,80^{\circ}$  W), cuja operação é de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Na Figura 2 exibe-se a localização da referida estação meteorológica. Foram utilizados os valores diários máximos anuais de precipitação pluviométrica, registrados no período compreendido entre os anos de 1970 a 2018.

No tocante aos dados de vazão, foram considerados os dados observados na bacia hidrográfica em evidência, entre os anos de 1968 e 2017, na estação fluviométrica localizada no Rio Acre, na cidade de Rio Branco, operada pela Agência Nacional de Águas – ANA, sob o código 13600002 ( $9,98^{\circ}$  S;  $67,80^{\circ}$  W), representada na Figura 2 (ACRE, 2012).

Foram utilizados apenas os dados já consistidos das referidas estações, operadas pelo INMET e ANA, para a realização do presente estudo. Foi aceito a consistência tanto da ANA, por meio do HidroWeb para os dados fluviométricos, quanto do INMET para os dados de chuva.



**Figura 2:** Localização da área de estudo e das estações dos registros hidrológicos de chuva e vazão em análise.

Tanto para a série pluviométrica quanto fluviométrica em destaque, verificou-se que o período de registro das informações, desde o início de operação, é marcado por importantes falhas, o que provocou maior atenção na análise. Por isso que se considerou a janela temporal de 1970 a 2018. O ano de 1991, por exemplo, não foi considerado nos testes realizados na série de chuvas, pois apresentou falhas que poderiam comprometer os resultados e, conseqüentemente a decisão sobre a hipótese em estudo. Convém esclarecer que não se lançou mão das técnicas de preenchimento por não ser recomendada diretamente para valores anuais (MIZUKAMI;SMITH, 2012).

Procedeu-se de modo análogo para os dados da estação fluviométrica, utilizando-se somente os dados já consistidos, razão pela qual o período considerado foi de 1968 a 2017, consoante à última análise de consistência empreendida e informada. No tocante às falhas encontradas no período considerado, observa-se aqui que foram preenchidas a partir dos métodos disponíveis na literatura da especialidade. Ressalta-se, nesse caso particular, que a presença e a análise das falhas existentes não comprometeram à realização do estudo, a exemplo de outros trabalhos realizados na região amazônica (DUARTE, 2006; MACÊDO et al., 2013).

#### **4.3. MÉTODOS ESTATÍSTICOS ADOTADOS NESTA PESQUISA**

##### **4.3.1. Verificação de tendências nas séries de precipitação e de vazão da região em estudo**

Os testes de verificação de tendências em séries de observações de variáveis hidrológicas ganharam notoriedade nas últimas décadas, pois se inserem no contexto das discussões sobre possíveis alterações climáticas em diferentes escalas. Além disso, a maioria dos métodos estatísticos desenvolvidos até o momento partem da premissa basal de séries estacionárias. Entretanto, já existem discussões que subsidiam evidências para rejeitar tal premissa e, por isso, via de regra, é fundamental analisar previamente a existência de possíveis tendências ou outra forma de não-estacionariedade nas séries em estudo (VILLARINI et al., 2010; SILVA et al., 2012; TIBÚRCIO; CORREIA, 2012; SALAS; OBEYSEKERA, 2014).

Muitos testes estatísticos foram concebidos sob o viés da verificação de tendências em séries hidrológicas e encontram-se disponíveis na literatura destinada ao tema. No contexto presente, o mais utilizado é o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), cuja estrutura e fundamentação é apresentada logo adiante, de acordo com Moreira et al., (2016a).

O teste não paramétrico de Mann-Kendall (também denominado por Teste MK) é amplamente utilizado para a identificação de tendências em séries de observações

hidrometeorológicas (PORTELA et al., 2011). Dada uma série  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  proveniente de uma amostra de  $n$  variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (iid), o teste MK é dado pela seguinte equação:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{ sinal } (X_j - X_i) \quad (4.1)$$

em que  $X_i$  representa os valores da série (nesse caso, tomados em intervalos de tempo anuais);  $i$  e  $j$  são os índices de tempo e  $n$  é o número de elementos da série. O termo  $\text{ sinal } (X_j - X_i)$  é determinado por intermédio da equação a seguir:

$$\text{ sinal } (X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{ se } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{ se } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{ se } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Mann (1945) e Kendall (1975) explicitaram que a estatística  $S$  segue aproximadamente uma distribuição normal para  $n \geq 8$ . Para dados sem elementos vinculados (valores iguais), a estatística do teste apresenta média  $E(S)$  e variância  $\text{Var}(S)$  dadas, respectivamente, por:

$$E(S) = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{Var}(S) = 1/18 [n(n-1)(2n+5)] \quad (4.4)$$

Havendo pontos vinculados, a variância é corrigida pela seguinte expressão:

$$\text{Var}(S) = 1/18 \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (4.5)$$

na qual  $t_p$  denota o número de pontos vinculados de índices  $p$  até  $q$ .

A significância do teste MK pode ser verificada através de um teste bilateral, com estatística padronizada  $Z_{MK}$  expressa da seguinte maneira:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{ se } S > 0 \\ 0 & \text{ se } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{ se } S < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

A hipótese nula ( $H_0$ ), para ausência de tendência na série, é rejeitada caso  $|Z_{MK}| > Z_{1-\alpha/2}$ , em que  $\alpha$  é o nível de significância adotado e  $Z_{1-\alpha/2}$  é o valor da distribuição normal

padrão com probabilidade de excedência de  $\alpha/2$ . O sinal de  $Z_{MK}$  indica se a tendência é crescente ( $Z_{MK} > 0$ ) ou decrescente ( $Z_{MK} < 0$ ). O nível de significância comumente utilizado é  $\alpha = 0,05$ , como é o caso do presente estudo.

O p-valor da estatística S para os dados da amostra pode ser estimado pela probabilidade acumulada da distribuição normal, considerando que se  $p \leq \alpha$ , o teste apresenta evidências para rejeição de  $H_0$ , sugerindo a presença de tendências na série.

Outro teste comumente utilizado para verificação de tendência temporal (o qual será utilizado neste trabalho para comparar com a decisão tomada a partir da Teste de Mann-Kendall) é o teste não-paramétrico de Spearman, também denominado de Spearman rho teste ou teste SR. Este teste visa a detecção de uma tendência temporal, possivelmente existente em uma série hidrológica a partir da correlação entre os dados da série de observações e o índice de tempo (NAGHETTINI; PINTO, 2007; SHADMANI et al., 2012; SANTOS et al., 2016).

O teste de Spearman se ampara no coeficiente de correlação entre a ordem de classificação  $m_t$ , da sequência  $X_t$  e os índices de tempo  $T_t$  (1, 2, ..., N). Conforme descrito por Moreira et al., (2019), a estatística do teste SR é baseada no coeficiente determinado a partir da seguinte equação:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (4.7)$$

Considerando-se a hipótese pautada na ausência de correlação entre  $m_t$  e  $X_t$ , demonstra-se, para  $N > 10$ , que a distribuição de  $r_s$  pode ser aproximada por uma distribuição normal, cuja média é nula e a variância é dada pela seguinte equação:

$$\text{Var}[r_s] = \frac{1}{N - 1} \quad (4.8)$$

Assim, tendo como hipótese nula  $H_0$ : “a amostra não apresenta tendência temporal”, a estatística do Spearman rho teste formulada a partir do valor obtido na Equação (4.9), a qual segue uma distribuição normal padrão.

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{\text{Var}[r_s]}} \quad (4.9)$$

Como se trata de um teste bilateral, a decisão mais lógica, nesse caso, é de rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) se  $|T| > Z_{1-\alpha/2}$ , em que  $\alpha$  é o nível de significância adotado e  $Z$  é o valor da distribuição normal padrão.

#### 4.3.2. Análise de frequência para os dados de precipitações e vazões diárias máximas anuais na cidade de Rio Branco

Para a análise de frequência aos dados em análise utilizou-se a distribuição de Gumbel para Máximos, ou dupla exponencial, que é uma das distribuições de probabilidades mais utilizadas na análise de frequências de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações, especialmente em estudos sobre o regime das precipitações e vazões máximas (COLES, 2001; KATZ, 2010).

Tal como descrito por Moreira et al., (2016a), a Função Acumulada de Probabilidades (FAP) da distribuição de Gumbel é expressa da seguinte forma:

$$F_X(x) = \exp \left\{ -\exp \left( -\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (4.10)$$

para  $-\infty < x < \infty$ ,  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $\sigma > 0$ , na qual  $\sigma$  e  $\mu$  são os parâmetros de escala e posição, respectivamente, e  $x$  o valor da variável independente. Já a função densidade da distribuição (fdp) de Gumbel é expressa pela equação (4.11):

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left\{ -\frac{x-\mu}{\sigma} - \exp \left( -\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (4.11)$$

No tocante à função de quantis de Gumbel, expressa-se na forma das equações (4.12) e (4.13):

$$x(F) = \mu - \sigma \ln[-\ln(F)] \quad (4.12)$$

$$x(T) = \mu - \sigma \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.13)$$

na qual  $F$  representa a probabilidade de não superação por um evento em um determinado período em análise, em meses, e  $T$  denota o período de retorno (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

O período de retorno associado a um quantil de referência  $x_T$  é o intervalo médio de tempo (em anos) para que o evento recorra em um ano qualquer, sendo definido como o inverso da probabilidade de excedência, anteriormente apresentado através da equação (2.4), em que  $F_X(x_T)$  é probabilidade de não excedência, conforme apresentado na equação (2.5). Por sua vez, o risco associado a cada período de retorno é obtido por meio da equação (2.7).

A definição de um modelo distributivo capaz de descrever as características probabilísticas de um fenômeno hidrometeorológico requer a estimação de seus parâmetros, por meio de métodos numéricos que, neste trabalho, utilizou-se o método da máxima verossimilhança, tal como apresentado no item 2.3.1.

Após o ajuste da distribuição aos dados em verificação, deve-se verificar a devida aderência dos mesmos à distribuição de Gumbel para máximos, aqui considerados o teste de

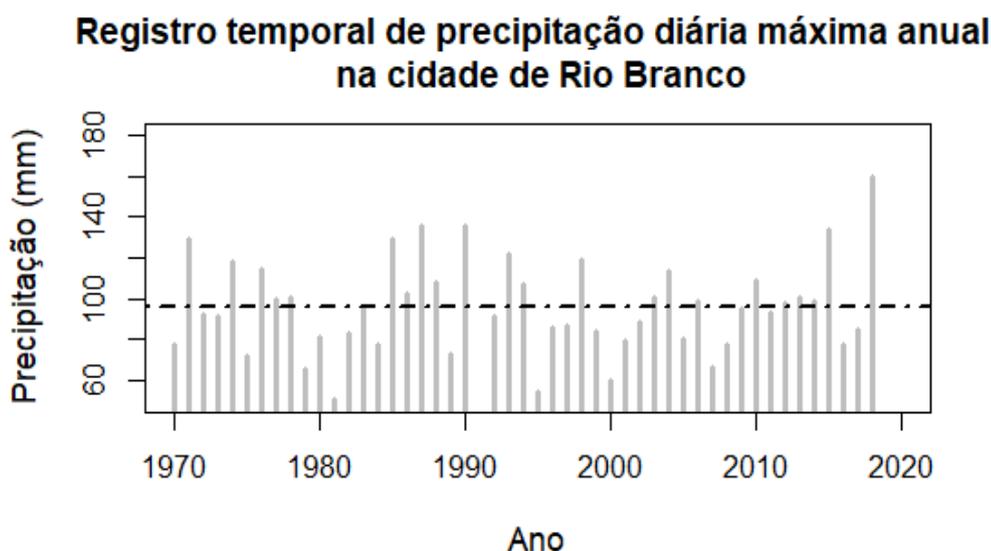
Kolmogorov-Smirnov e o teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), cujas rotinas e argumentos de decisão encontram-se descritos na literatura da especialidade, com destaque para Naghettini e Pinto 2007; Silvino et al., (2007).

Destaca-se que a aplicação prática dos testes estatísticos em destaque exigem demasiada rotina e cálculos até tomada de decisão sobre as hipóteses testadas e, por isso, lançou-se mão de diversas ferramentas computacionais, com destaque aos pacotes disponíveis na plataforma do software livre R (<https://www.r-project.org/>) (SPECTOR, 2008; R CORE TEAM, 2019).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. ANÁLISE PRELIMINAR

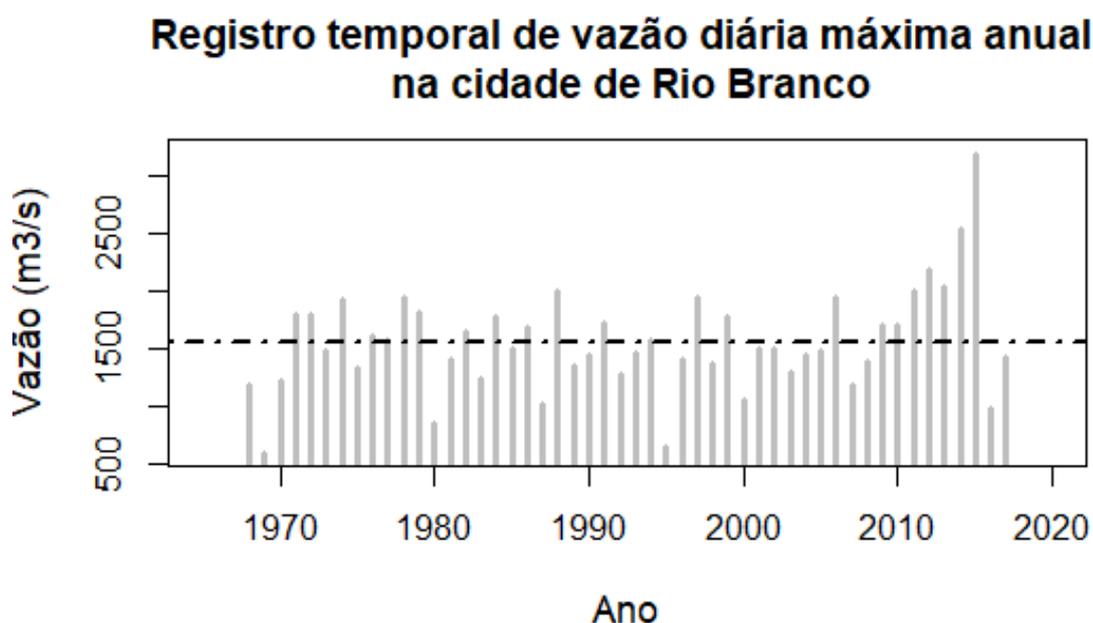
Preliminarmente, realizou-se uma análise descritiva dos dados de vazões e precipitações pluviométricas máximas registradas na cidade de Rio Branco. Neste passo, verificou-se que a média histórica para o período de 1970 a 2018 da precipitação diária máxima anual registrada na região em estudo foi de 95,82 mm, enquanto o valor máximo registrado foi de 159,2 mm, gravada no ano de 2018. Por outro lado, o valor mínimo da precipitação pluviométrica para o período em análise foi registrado no ano de 1981, anotado em 50,80 mm. Adicionalmente, verificou-se variação nos valores registrados para o período em estudo, os quais 45,83% deles se encontram acima da média histórica. Na Figura 3 exibe-se o comportamento temporal dos valores máximos de precipitação pluviométrica anual registrados no período em destaque, em que a linha horizontal pontilhada representa o valor da precipitação média para o período em análise.



**Figura 3:** Valores de precipitação diária máxima anual registrados em Rio Branco, no período de 1970 a 2018

Tanto os valores destacados quanto a variação observada se assemelham quantitativamente a outras regiões da Amazônia, que costumam apresentar altos valores de precipitação e variação entre os valores máximos e mínimos registrados (MACEDO et al., 2013; SANTOS et al., 2018). Neste sentido, Santos et al., (2013) reconhecem a variabilidade existente para região em estudo no tocante ao regime de precipitação e sugerem que tal comportamento pode ser influenciado por fenômenos como ZCAS e ZCIT.

No tocante à vazão diária máxima anual registrada no rio Acre, na estação instalada na cidade de Rio Branco evidenciou comportamento semelhante para a variação entre o valor mínimo e o valor máximo registrados no período de 1968 a 2017, apontados em 599,05 m<sup>3</sup>/s e 3.174, 92 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. O valor máximo aconteceu em 2015 e o valor mínimo no ano de 1969. Durante o período em destaque, a proporção de valores de vazão máxima anual registrados em Rio Branco foi semelhante ao comportamento pluviométrico. Verificou-se que 46% dos registros mostraram-se acima do valor médio para o período, de 1.560,17 m<sup>3</sup>/s. A Figura 4 apresenta o comportamento dos valores de vazão máxima registrados na cidade de Rio Branco durante o período em análise, na qual se representa o valor médio pela linha pontilhada.



**Figura 4:** Vazões diárias máximas anuais registradas no período de 1968 a 2017, em Rio Branco, Acre.

A partir da Figura 4, verifica-se que na última década há maior percentual dos valores de vazão acima da média do período. A constatação pode estar relacionada a alterações nas condições hidrológicas da bacia hidrográfica em questão ou de regiões adjacentes, advindas do resultado de atividades antrópicas ou até mesmo da ação de fenômenos relacionados à variabilidade climática natural. Pode-se, evidentemente, ser resultado da ação conjunta desses fatores.

Neste sentido são valorosas as conclusões apresentadas por Pereira e Szlafsztein (2015), cujo estudo elucidou que alterações recentes no comportamento de diversos fenômenos climáticos podem contribuir para ocorrências extremas no regime hidrológico da região em qual

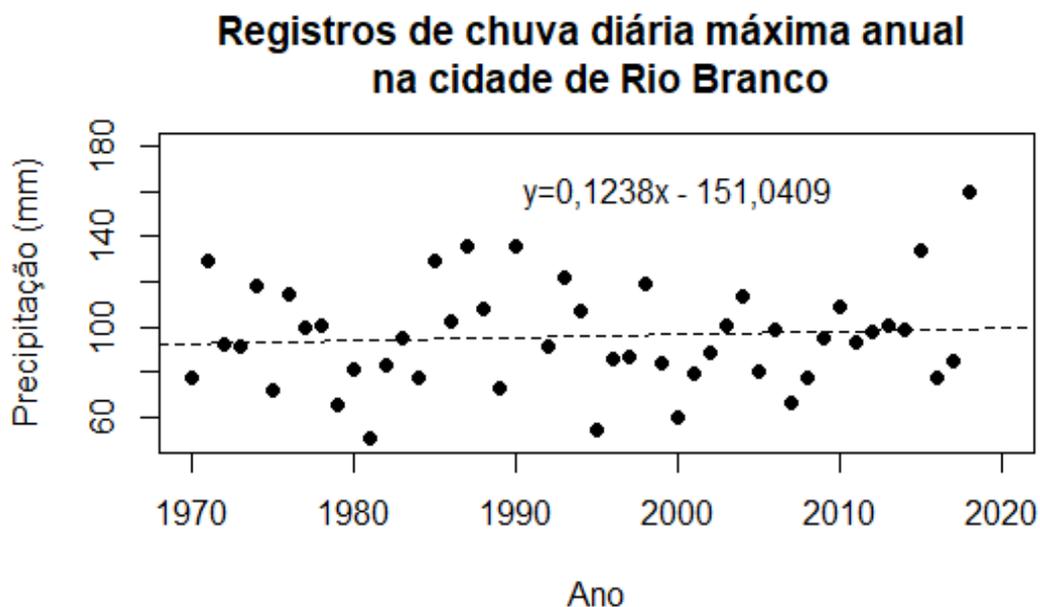
está inserida a cidade de Rio Branco. Os autores destacam, ainda, que ocorrências intensas do fenômeno La Niña geralmente implicam inundações em diversos rios da Amazônia. Outros fenômenos como o aquecimento anômalo da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), ZCAS, Alta da Bolívia, etc., influenciam igualmente no regime hidrológico da bacia amazônica, especialmente na ocorrência de cheias extremas. Nesse viés, a região em destaque ainda é um vasto campo para pesquisas futuras.

Os valores altos de vazão como a dinâmica fluvial na qual se verifica acentuada variabilidade nos registros são características marcantes dos rios da região em estudo e demais rios da Amazônia conforme relatam Macedo et al., (2013); Moreira et al., (2019).

Pereira e Szlafsztein (2015) destacam que a ocorrência de registros extremos para os fenômenos naturais, especialmente as variáveis hidrológicas, afetam as populações mais vulneráveis para a região em estudo. Sena et al., (2012) acrescentam que os altos valores de vazão bem como os extremos mínimos estão entre os principais problemas ambientais relacionados à dinâmica dos processos atuantes na bacia do rio Acre, as quais impactam em questões relacionadas à vulnerabilidade social, econômica e ambiental da região.

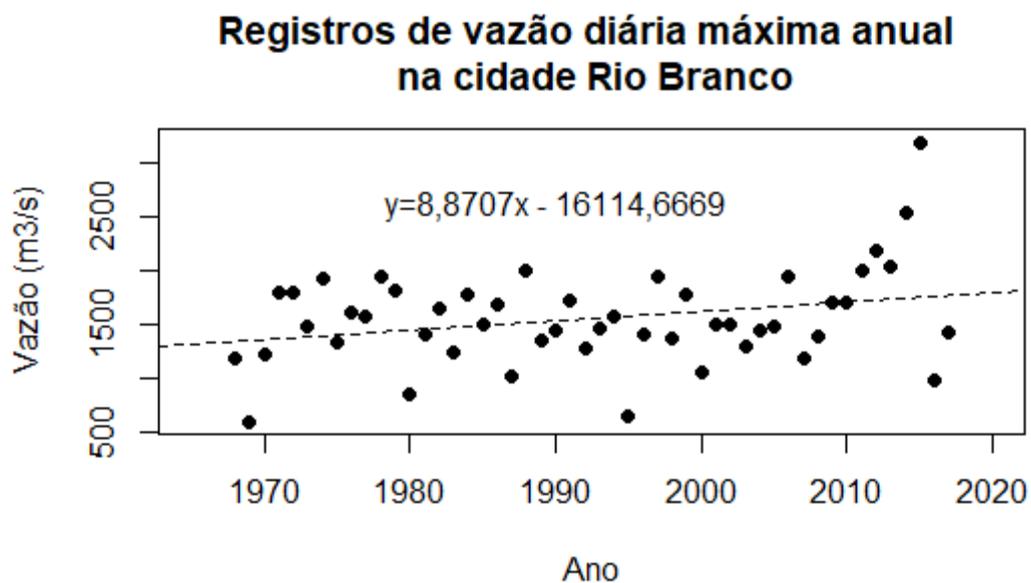
## **5.2. TENDÊNCIAS TEMPORAIS NOS REGISTROS DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO MÁXIMA EM RIO BRANCO**

A partir dos registros de precipitação pluviométrica para a região em estudo, verificou-se comportamento ascendente para os valores de precipitação diária máxima anual, em Rio Branco, para o período em verificação. A Figura 5 exibe a nuvem de pontos que representam tais registros ao longo do período de 1970 a 2018, destacando-se a linha pontilhada que se refere à tendência linear temporal para a série histórica, bem como a equação a ela associada.



**Figura 5:** Comportamento temporal dos registros de precipitação diária máxima anual em Rio Branco, para o período de 1970 a 2018.

Já em relação à série de vazões registradas na estação fluviométrica instalada em Rio Branco, observou-se comportamento semelhante ao constatado para o regime pluviométrico, qual seja ascendente para período analisado. A Figura 6 exibe a representação de tais registros no período de 1968 a 2017, além da tendência linear temporal e a equação a ela associada.



**Figura 6:** Comportamento temporal dos registros de vazão diária máxima anual em Rio Branco, para o período de 1968 a 2017.

Em relação ao comportamento linearmente ascendente, observado tanto para a vazão quanto para a precipitação registradas em Rio Branco, as evidências constituídas a partir da aplicação dos testes não-paramétricos de Mann-Kendall e de Spearman convergem para a rejeição da hipótese de tendência significativa ao longo do tempo para as séries destacadas, ao nível de significância 5%. Ou seja, não se deve rejeitar a hipótese de que as séries hidrológicas em questão podem ser caracterizadas como temporalmente estacionárias.

Os valores obtidos para a estatística do teste de Mann-Kendall e do teste de Spearman são inferiores a  $Z_{0,975} = 1,96$ , o que confirma a decisão de não rejeitar a hipótese de estacionariedade nas referidas séries, ao nível de significância 5%. A decisão é ratificada pelo p-valor, conforme exibido na Tabela 4, que exhibe também os valores da estatística de teste para as séries analisadas.

**Tabela 4:** Resumo dos resultados dos testes de tendências para as séries de precipitações e de vazões diárias máximas anuais registradas em Rio Branco, Acre.

Precipitação			Vazão		
Teste	Estatística de teste	p-valor	Teste	Estatística de teste	p-valor
Mann-Kendall	$Z_{MK} = 0,302$	0,762 <sup>NS</sup>	Mann-Kendall	$Z_{MK} = 1,489$	0,137 <sup>NS</sup>
Spearman Rho	$T = 0,274$	0,384 <sup>NS</sup>	Spearman Rho	$T = 1,383$	0,153 <sup>NS</sup>

NS = não significativo, ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

No tocante ao comportamento linearmente ascendente identificado para as variáveis em tela, o resultado é semelhante aos apresentados como parte das conclusões em diversos estudos realizados tanto em regiões com características hidrológicas ou climáticas similares à região destacada no presente estudo quanto para condições diferenciadas (BLAIN; MORAES, 2011; SANTOS; SILVA, 2016; SHI et al., 2018). Neste sentido, destacam-se os trabalhos conduzidos por Delgado e Souza (2014) e Moreira et al., (2016a) e por cujos resultados se referem a estudos realizados na região cujo contexto climático e hidrológico a cidade de Rio Branco está inserida.

Pereira e Szlafsztein (2015) também outorgam conclusões similares sobre o comportamento hidrológico dos rios da Amazônia. Para os autores a complexidade das interações climáticas que atuam na região promovem incertezas no regime hidrológico, mas em

geral acarretam aumento dos registros temporais dessas variáveis, especialmente das vazões e das precipitações.

Quanto à não rejeição da hipótese de estacionariedade temporal, apesar de variabilidade sazonal e do resultado da ação de diversos fatores que atuam na região de Rio Branco, os resultados sugerem que a ação desses fatores não provocou tendência temporal significativa, pelo menos para a janela temporal considerada. Os resultados se assemelham aos que foram relatados em estudos anteriores, a exemplo do trabalho realizado por Ahmad et al., (2015), que se dedicou a analisar tendências temporais nos registros pluviométricos da bacia hidrográfica do rio Swat, no Paquistão. Os autores relatam tendência crescente na maioria das estações presentes naquela bacia, entretanto, não significativas, igualmente ao que se verificou nos registros pluviométricos analisados no presente estudo. Ressalta-se que os autores utilizaram as mesmas ferramentas estatísticas, qual seja os testes de Mann-Kendall e de Spearman. Além disso, os autores sugerem a necessidade de estudos futuros para a referida bacia, sobretudo no tocante à modelagem estocástica das ocorrências registradas, uma vez que estas têm poder preditivo e podem auxiliar no controle dos impactos de possíveis alterações climáticas que atuam de forma direta ou indireta no regime hidrológico da região.

Por outro lado, há relatos de tendência temporal significativa em registros hidrológicos em outras regiões, como é o caso do estudo realizado por Guedes et al., (2019) que, utilizando metodologia similar, detectou tendências significativamente ascendentes nos registros de precipitação total anual em algumas estações localizadas na região Norte do Estado do Rio Grande do Sul. Os autores elucidam que o aumento anual verificado está possivelmente relacionado com a ocorrência de El Niño e La Niña, porém, sugerem estudos futuros no intuito de verificar alterações hidrológicas em função do uso e ocupação do solo da região.

Neste sentido, Moreira et al., (2019) descrevem conclusões de outros estudos sobre a verificação de tendências em séries hidrológicas, a exemplo de Santos et al., (2013), para os quais os registros de vazão, em sua maioria, são afetados por ações atribuídas à atividade humana sobre os fatores climáticos que atuam na bacia hidrográfica. A conclusão é subscrita por Uliana et al., (2015) que, por sua vez, alertam ao fato de que mudanças na ocupação e uso do solo alteram as condições de infiltração da água e, conseqüentemente, provocam alterações no regime de escoamento superficial e de base. O estudo proposto por Moreira et al., (2019) acrescenta que o regime de vazões registradas na região do Rio Juruá não sofreu alterações significativas ao longo do tempo, e pode ser uma característica marcante daquela região e de áreas adjacentes, como é o caso da cidade de Rio Branco.

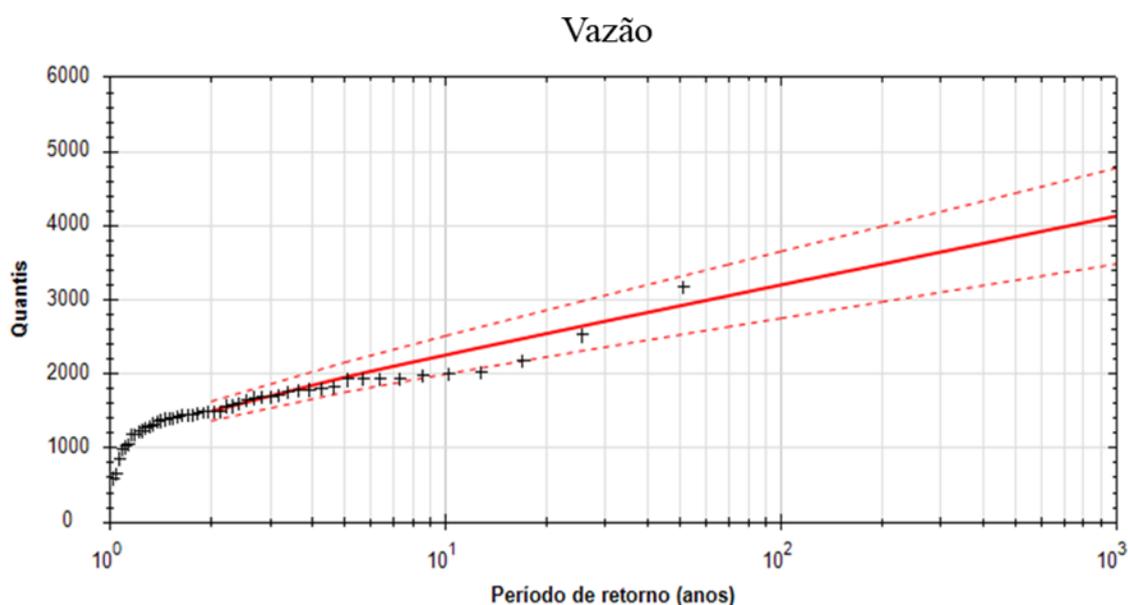
### 5.3. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E RISCO DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO MÁXIMA EM RIO BRANCO

A partir dos elementos metodológicos descritos no item 4.3.2 (que se destina à análise de frequência e estimação do risco hidrológico para as séries em análise) verificou-se que os valores de vazões e precipitações máximas registradas em Rio Branco ajustam-se à distribuição de probabilidades de Gumbel. Os parâmetros de posição ( $\mu$ ) e escala ( $\sigma$ ) atinentes à referida distribuição, estimados por meio do método da máxima verossimilhança estão dispostos da Tabela 5.

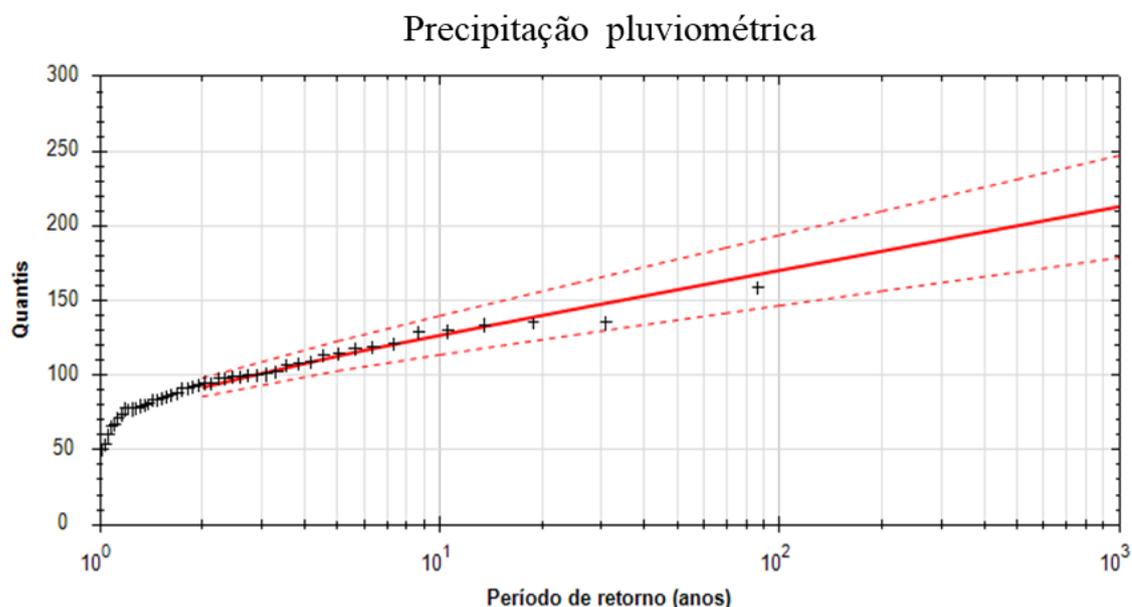
**Tabela 5:** Valores dos parâmetros de posição ( $\mu$ ) e escala ( $\sigma$ ) da distribuição de Gumbel para máximos ajustada aos valores de precipitações e vazões diárias máximas anuais em Rio Branco, Acre.

Precipitação		Vazão	
Posição	$\mu = 85,000$	Posição	$\mu = 1.353,896$
Escala	$\sigma = 20,089$	Escala	$\sigma = 402,331$

O ajuste dos dados à distribuição de Gumbel é representado na Figura 7 e na Figura 8. Na ilustração são apresentados os valores referentes aos quantis observados e os quantis empíricos, plotados em um papel de probabilidades de Gumbel, valendo-se da posição de plotagem de Gringorten, em um intervalo de confiança de 95%, cujos limites são representados pelas linhas pontilhadas (NAGHETTINI; PINTO, 2007; MOREIRA et al., 2016a).



**Figura 7:** Ajuste aos valores máximos de vazão à distribuição de Gumbel, utilizando-se a posição de plotagem de Gringorten, com intervalo de confiança de 95%.



**Figura 8:** Ajuste aos valores máximos de precipitação pluviométrica à distribuição de Gumbel, utilizando-se a posição de plotagem de Gringorten, com intervalo de confiança de 95%.

Após o ajuste da distribuição de Gumbel aos dados de vazão e precipitação pluviométrica em análise, verificou-se que os pressupostos de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade foram devidamente atendidos (YUE, 2000; MOREIRA et al., 2016a). Destaca-se que a estacionariedade já havia sido verificada, conforme discutido no item 5.2.

Adicionalmente, valendo-se dos testes de Kolmogorov-Smirnov e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), foi devidamente verificada a aderência dos dados em análise à distribuição de Gumbel. Os resultados obtidos revelaram evidências suficientes para concluir em favor da hipótese de que os valores observados foram extraídos de uma população cujos valores conformam-se à distribuição de Gumbel, ao nível de significância 5% e, assim, confirmam bom ajuste dos dados à distribuição de probabilidades em ênfase (MOREIRA et al., 2016a; YUAN et al., 2018).

A partir dos valores estimados para os parâmetros da distribuição, expressos na Tabela 5, as equações (4.10) a (4.13) são ferramentas importantes para modelar o comportamento probabilístico dos dados em verificação e estimar a probabilidade de superação a um evento danoso, bem como relaciona sua ocorrência ao tempo de retorno e risco hidrológico, estimados conforme expressos nas equações (2.4) e (2.7). Os referidos valores, utilizados em conjunto ou separadamente, são importantes instrumentos de apoio à decisão, sobretudo em situações extremas, em que a prática de soluções eficientemente capazes de atenuar os impactos associados à ocorrência/recorrência de tais eventos é valiosa. Tal pensamento é compatível com

o que expressam Miguez et al., (2018) que, adicionalmente, elucidam que são instrumentos de auxílio à redução da vulnerabilidade a aumento da resiliência em um sistema.

Nesta perspectiva, na Tabela 6 são apresentados os valores dos quantis de precipitação pluviométrica e de vazão associados aos principais valores do Tempo de Retorno, denominados de quantis notáveis. Os respectivos valores foram obtidos a partir da distribuição de Gumbel para máximos ajustada aos dados, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 5.

**Tabela 6:** Quantis notáveis de vazão e de precipitação pluviométrica máximas anuais para a cidade de Rio Branco, estimados pela distribuição de Gumbel.

Tempo de retorno (anos)	Precipitação (mm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
2	92,36	1.501,36
5	115,14	1.957,37
10	130,21	2.259,29
25	149,26	2.640,76
69	169,92	3.054,47
100	177,41	3.204,68
200	191,39	3.484,56
500	209,83	3.853,82
1.000	223,76	4.132,90

Os valores apresentados na Tabela 6 são elementos importantes para a gestão de recursos hídricos, sobretudo no auxílio a tomada de decisão sobre medidas de atenuação dos impactos de eventos hidrológicos extremos. Por exemplo, o quantil de vazão associado ao tempo de retorno  $T = 100$  anos, obtidos a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 5 e por meio da equação (4.13), é de 3.204,68 m<sup>3</sup>/s. Conforme assinalado no item 2.3.2, esse valor equivale à vazão de referência correspondente à probabilidade associada ao tempo médio de 100 anos para que o evento recorra em um ano qualquer, ou seja, é o tempo médio necessário para que tal cheia recorra, em um ano qualquer. No tocante à precipitação pluviométrica destaca-se que, para o mesmo tempo de retorno, o quantil considerado é de 177,41 mm.

Dessa forma, que o valor máximo de precipitação diária máxima anual registrado no período em análise, na cidade de Rio Branco, está associado ao tempo de retorno  $T = 41$  anos, cuja probabilidade de recorrência é de aproximadamente 2,4%. Para a vazão diária máxima

anual, o tempo de retorno e a probabilidade de recorrência são, respectivamente, 93 anos e 1,08%.

Neste viés, é meritório o que ressaltam Francisco et al., (2015) no tocante à importância do conhecimento sobre o comportamento probabilístico das variáveis hidrológicas, especialmente de chuva e vazão. Os autores acrescentam que tal conhecimento é essencial para tomada de decisão em diversas áreas estratégicas, sobretudo ao planejamento de atividades voltadas a atenuação dos impactos associados a eventos hidrológicos extremos.

Neste sentido, é válido o que relatam Saito et al., (2019), destacando que embora os processos hidrológicos façam parte da dinâmica natural da superfície terrestre, um sistema social preparado para o enfrentamento desses eventos obtém mais sucesso na redução dos impactos sociais, econômicos e ambientais, dada a complexidade nas relações dos componentes naturais que envolvem as bacias hidrográficas (ARAGÃO; GOMES, 2019).

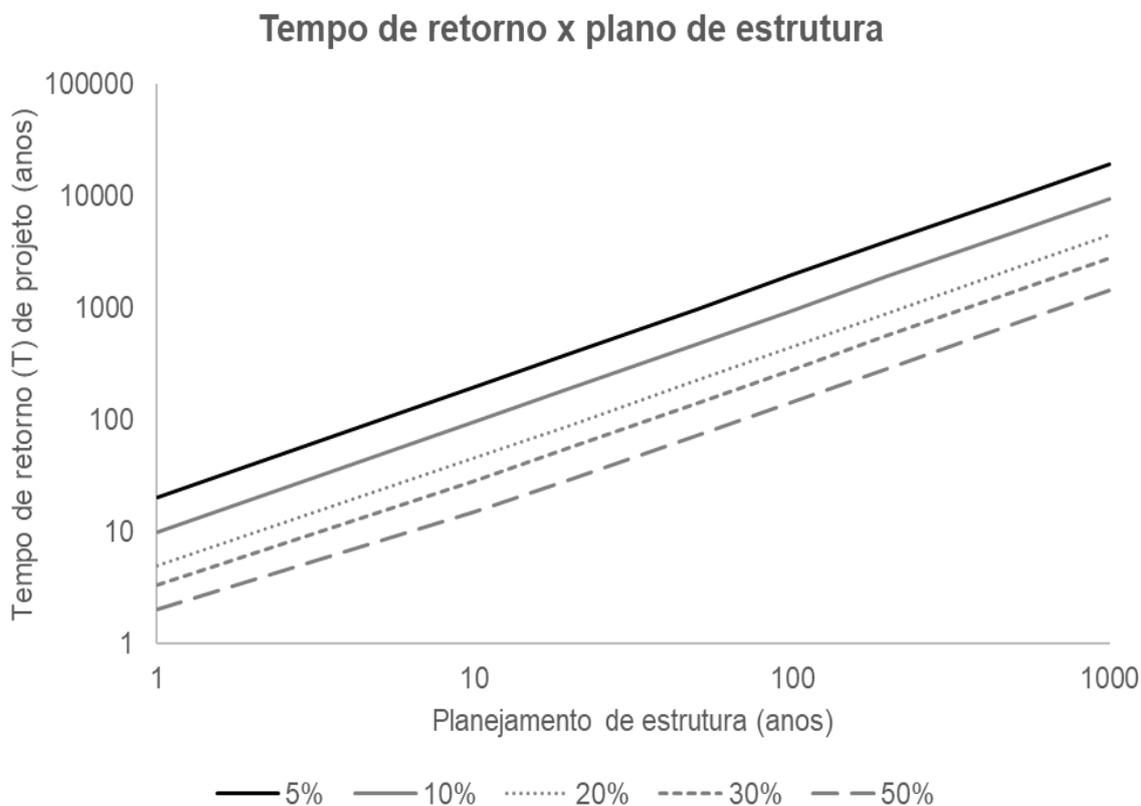
Os resultados podem, além disso, ser demandados em estudos futuros atrelados à relação entre chuva e vazão, pois estão elencados entre os elementos importantes para o gerenciamento do risco que envolvem a interação de tais variáveis em uma bacia hidrográfica, especialmente aquelas com alto índice de ocupação, que potencializa a materialização de danos inerentes a eventos extremos. De fato, de acordo com Miguez et al., (2018), a chuva é o evento natural que dispara o processo de cheias, entretanto, não a classificam como o perigo em si, uma vez que a cheia é um dos resultados do processo de transformação da chuva em vazão.

Miguez et al., (2018) contribuem ainda mais, neste sentido, ao expor que a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso é um dos componentes do conceito moderno de gestão do risco que, tem a expectativa de perdas causadas pelo evento como a outra componente (esta subdividida em função do perigo, vulnerabilidade e outros fatores).

Com isso, tendo-se em conta que o risco de inundação é passível de ser gerenciado e pode ser reduzido, os resultados obtidos servirão de base para ações de atenuação do risco associado a eventos extremos de cheias na cidade de Rio Branco, especialmente em termos da componente da probabilidade de suas ocorrências.

Outro importante desdobramento da distribuição ajustada aos dados é o risco hidrológico associado ao tempo de retorno. Ele é elemento necessário para a tomada de decisão e deve ser previamente fixado no planejamento de ações empreitadas, sobretudo em função do dimensionamento de estruturas de atenuação dos impactos de eventos extremos, bem como das consequências de eventual superação. A relação tempo de retorno em função do tempo de

planejamento de determinada estrutura é expresso na Figura 9, para vários níveis de risco hidrológico associado.

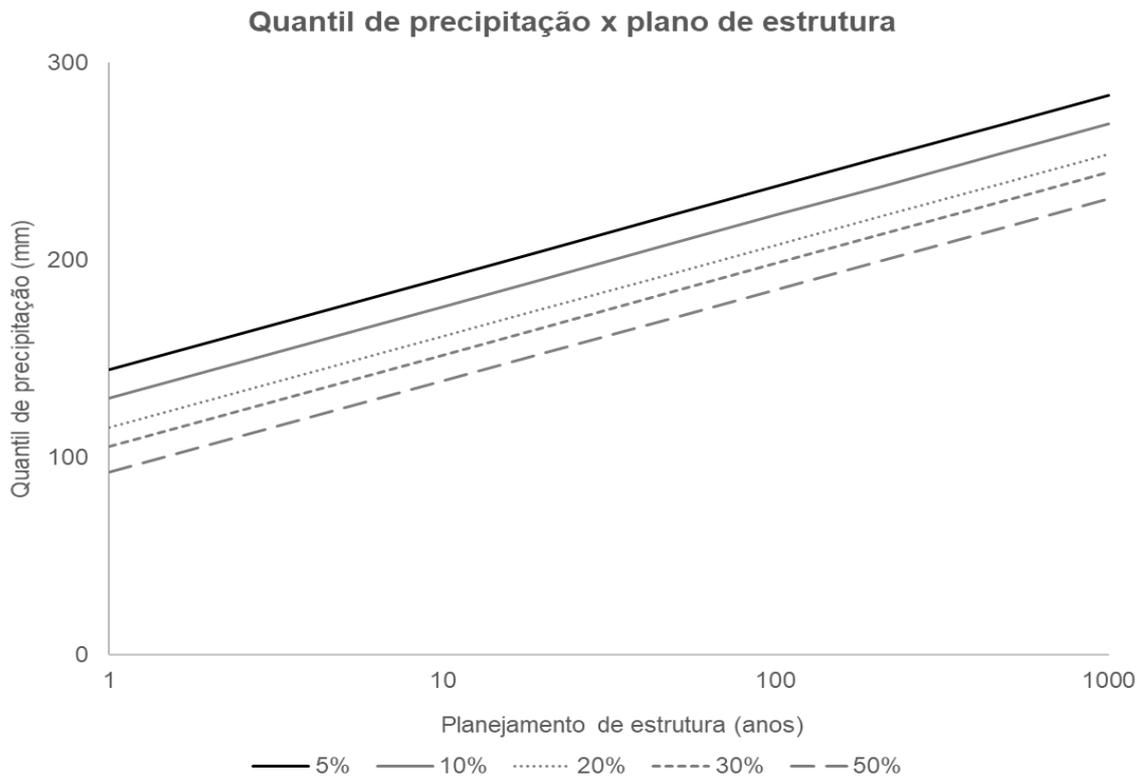


**Figura 9:** Tempo de retorno de projeto em função do risco hidrológico e tempo de planejamento de uma estrutura de atenuação de impactos de eventos hidrológicos extremos.

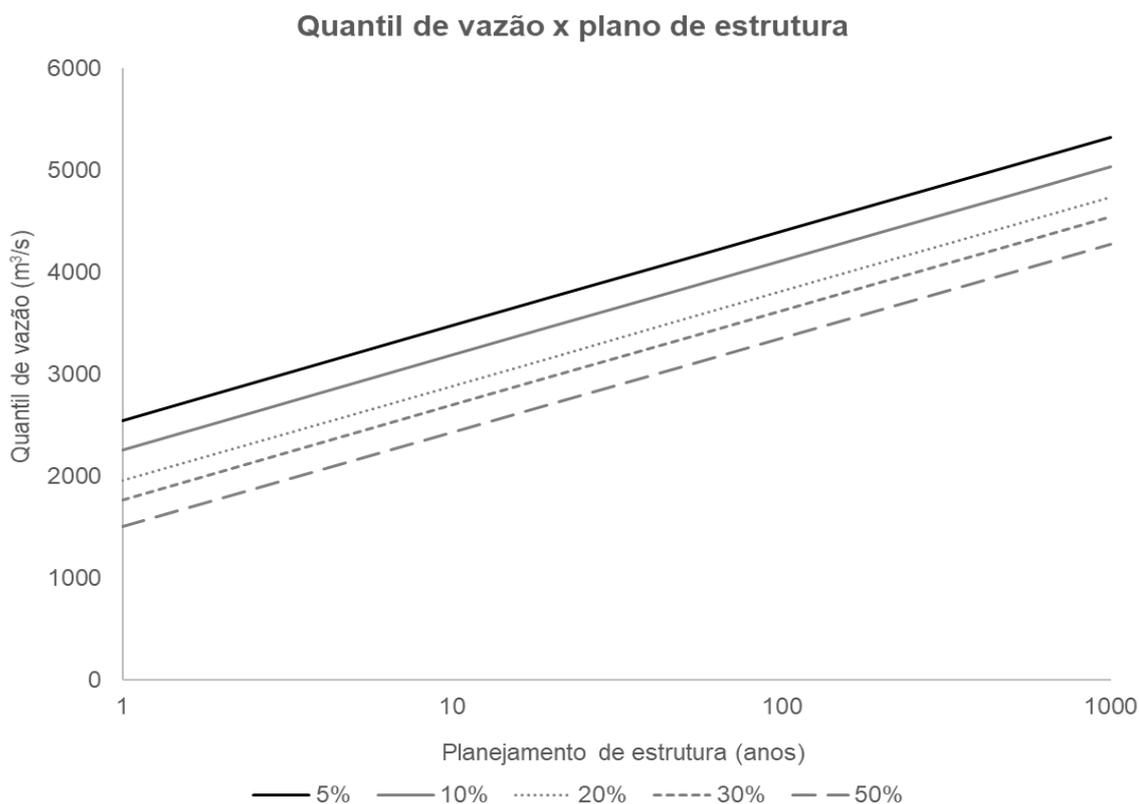
Neste caso, observa-se, por exemplo, que uma empreitada cujo planejamento tenha como objetivo uma vida útil de 10 anos, o tempo de retorno associado a um risco de 5% é de aproximadamente 195 anos, enquanto para o risco de 20% o tempo de retorno é de 45 anos. Ou seja, para maior valor do risco hidrológico está associado menor valor de tempo de retorno e, conseqüentemente menor quantil de cheia ou de precipitação a ser considerado no planejamento.

Destarte, supondo-se um cenário em que se deseja empreender um esforço de adaptação frente aos impactos de eventos hidrológicos extremos na cidade de Rio Branco, os resultados obtidos são importantes elementos de auxílio à decisão. A partir de decisão do tempo de vida útil que se pretende para a empreitada e do risco hidrológico a que esta deve ser submetida, obtém-se o tempo de retorno e o quantil a ele associado, seja de precipitação ou de vazão. Tal valor é relatado por Moreira et al., (2016b) como o quantil de vida útil, referindo-se à tradução livre do termo em língua inglesa *Design Life Level*, cuja metodologia foi apresentada por

Rootzén e Katz (2013). Na Figura 10 e na Figura 11 apresentam-se as relações entre o tempo de vida útil da medida que se deve empreender e o quantil relacionado, sob o risco hidrológico pretendido, sob um cenário de decisão na cidade de Rio Branco, tanto para precipitação como para vazão.



**Figura 10:** Quantil de precipitação associado a tempo de vida útil de uma estrutura de adaptação frente aos impactos de eventos hidrológicos externos, na cidade de Rio Branco, Acre.



**Figura 11:** Quantil de vazão associado a tempo de vida útil de uma estrutura de adaptação frente aos impactos de eventos hidrológicos extremos, na cidade de Rio Branco, Acre.

A partir desses resultados, supondo-se em um cenário hipotético em que se pretende realizar uma estrutura para fins hidrológicos, na cidade de Rio Branco, com tempo de vida útil de 100 anos e que o risco hidrológico a ela associada seja 10%. Na Figura 10, verifica-se que o quantil de precipitação (quantil de vida útil de precipitação) é de 222,72 mm. Por sua vez, na Figura 11 verifica-se, trivialmente, que o quantil de vazão associada à empreitada é de 4.112,09 m<sup>3</sup>/s.

Assim, outros valores do quantil de vida útil, tanto para a precipitação quanto para a vazão, podem ser determinados sob diferentes cenários do tempo de vida útil e do risco hidrológico estabelecidos frente ao planejamento de ações voltadas à gestão dos eventos hidrológicos extremos, na cidade de Rio Branco. No APÊNDICE <sup>1</sup>exibe-se, além do valor exemplificado, outros valores comumente utilizados no contexto do planejamento de estratégias frente aos impactos dos eventos hidrológicos.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho concentrou-se na finalidade de oportunizar elementos preconizados de auxílio à tomada de decisões concernentes as políticas relacionadas à gestão dos recursos hídricos na cidade de Rio Branco, Acre, bem como subsidiar pesquisas complementares na região, contribuindo para a preparação da sociedade frente aos impactos de eventos extremos.

Neste sentido, pôs-se em argumento inúmeros conceitos alcançados pela finalidade apresentada, especialmente alguns métodos correntes de inferência estatística, além de outros tópicos relevantes ao estudo dos processos hidrológicos. Destarte, o estudo se concentrou em analisar o comportamento temporal dos registros máximos de chuva e de vazão anotados na cidade de Rio Branco, Acre, destacando possíveis tendências temporais, além de realizar uma análise de frequência para as variáveis hidrológicas em questão, destacando os quantis de referência e suas referidas probabilidades de recorrência.

Em linhas gerais, os propósitos delineados com a realização deste trabalho foram alcançados. O estudo contemplou resultados satisfatórios e apropriados para promover uma discussão conveniente e, como implicação, levou a outras conclusões importantes, conforme assinaladas:

- Os resultados revelam evidências convergentes para a conclusão de que, tanto os registros diários máximos anuais de vazão quanto de precipitação pluviométrica, apontados em Rio Branco, apresentam tendência linearmente ascendente, todavia, não significativa, segundo os testes de Mann-Kendall e Spearman Rho, ao nível de significância  $\alpha = 5\%$ . Com isso, permite-se concluir pela ocorrência de alterações nos padrões hidrológicos, promovendo incremento dos registros máximos de vazão e precipitação pluviométrica ao longo do tempo, ainda que estatisticamente não significativa. Contudo, alerta-se para a precocidade de se atribuir a causa principal de tal alterações aos efeitos das ações antrópicas, da variabilidade climática ou da ação conjunta desses fatores.
- Valendo-se da teoria assintótica de valores extremos e do método da máxima verossimilhança para a estimação dos parâmetros, verificou-se que a distribuição de Gumbel (para máximos) é apropriada ao ajuste dos dados de precipitação pluviométrica e vazão para a cidade de Rio Branco, cuja aderência foi devidamente verificada. Assim, a Função Acumulada de Probabilidades (FAP) estimada para os valores diários máximos anuais de precipitação pluviométrica para a cidade de Rio Branco é dada por  $F_X(x) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-85}{20,089}\right)\right\}$  enquanto a FAP ajustada para a vazão é expressa por  $F_X(x) =$

$\exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-1.353,896}{402,331}\right)\right\}$ . A partir de tais equações, pode-se determinar o quantil de vida útil associado ao risco hidrológico e ao tempo de vida útil de uma empreitada com vistas ao planejamento de ações frente aos impactos de eventos extremos, sobretudo num cenário de inundações severas. Evidentemente, tal ajuste necessita de revisão à medida que foram sendo registrados novos valores, ao longo do tempo, para as variáveis em ênfase.

Mesmo diante de resultados favoráveis e de conclusões importantes no âmbito da gestão dos recursos hídricos em escala regional, não se pretende findar a discussão ora exibida. Pelo contrário, a intenção é que a abordagem convalide algumas hipóteses e/ou levante novas evidências sobre o comportamento dos fenômenos hidrológicos que atuam na região, além de subsidiar pesquisas futuras na área em destaque, em regiões semelhantes ou até mesmo naquelas com características distintas, mas cuja metodologia seja adequada. Com isso, permite-se compreender melhor a dinâmica dos fenômenos hidrológicos que atuam na região, bem como e interação desses com aqueles que habitam as áreas sujeitas a suas consequências.

Nesta conformidade, são elencadas algumas recomendações que podem ser úteis para a realização de pesquisas futuras no contexto da região estudada.

- Estudar a relação chuva-vazão na região, buscando inserir informações hidrológicas de regiões adjacentes que possivelmente impactem no escoamento superficial registrado na cidade de Rio Branco;
- Investigar o comportamento de variáveis climáticas que atuam na região e sua interação com as variáveis hidrológicas arroladas neste estudo, uma vez que a ação conjunta ou isolada de tais variáveis pode estar relacionada com o incremento de vazão de precipitação verificado para a cidade de Rio Branco. Entre tantos fenômenos que atuam na região exemplificam-se ENSO, ZCAS, Alta da Bolívia, etc. pois, como bem destacam Pereira e Szlafsztein (2015), podem influenciar na dinâmica dos rios da Amazônia.
- Comparar a relação das variáveis analisadas com registros associados aos efeitos das ações antrópicas, tais como índice de desmatamento, taxa ocupacional, índices de impermeabilização do solo, etc., pois tais elementos podem promover flutuações nos padrões hidrológicos da região (SANTOS, 2013; PEREIRA et al., 2010).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACRE (Estado). Governo do Estado do Acre. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Rio Branco: SEMA, 2012.
- AHMAD, I.; TANG, D.; WANG, T. F.; WANG, M.; WANG, B. Precipitation trends over time using Mann-Kendall and Spearman's rho tests in Swat river basin, Pakistan. **Advances in Meteorology**, v. 2016, 431860, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: Desafios para a gestão**. Brasília: ANA, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: ANA, 2016.
- AMBRIZZI, T.; ARÁUJO, M. PMBC: Base científica das mudanças climáticas: Primeiro relatório de avaliação nacional sobre mudanças climáticas. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2014.
- ARAGÃO, J. P. G. V.; GOMES, E. T. A. Vulnerabilidades em manchas urbanas ao longo das margens fluviais do Capibaribe – Pernambuco/Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 31, 1-28, 2019.
- BARD, A.; RENARD, B.; LANG, M.; GIUNTOLI, I.; KORCK, J.; KOBOLTSCHNING, G.; JANZA, M.; D'AMICO, M.; VOLKEN, D. Trends in the hydrologic regime fo Alpes rivers. **Journal of Hydrology**, v. 529, p. 1823-1837, 2015.
- BLAIN, G. C.; MORAES, S. O. Caracterização estatística de oito séries de precipitação pluvial máxima diária da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 225-234, 2011.
- BRUMES, K. R. Cidades: (Re) definindo seus papéis ao longo da História. **Caminhos da Geograia**, v. 2, n. 3, p. 47-56, 2001.
- CAMPOS, T. L. . B.; MOTA, M. A. S.; SANTOS, S. R. Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas em jornais. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, 182-194, 2015.
- CARMO, L. F. Z.; LATUF, Marcelo de Oliveira. Determinação da Capacidade de Armazenamento de Água nos Solos do Município de Rio Branco/AC. In: **VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia**, 2008, Belo Horizonte. Anais do VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, 2008.

CARVALHO, P. Desastres naturais matam 4.996 pessoas em 2018. **Veja**, 27 de dez. de 2018. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/mundo/desastres-naturais-matam-4-996-pessoas-em-2018/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGrawHill, 1988, 588p.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED. **The Internacional Disaster Database**. Disponível em: <<https://www.emdat.be>>. Acesso em: 10 de maio de 2019.

CEPED-UFSC. Cheia do Rio Madeira Afeta Rondônia, Pará, Acre e Amazonas. 2015. Disponível em: <<http://www.ceped.ufsc.br/2014-cheia-do-rio-madeira-afeta-rondonia-acre-e-amazonas/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.

CLARKE, R. T. Hidrologia Estatística. In: TUCCI, C. E. M (org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012, p.659-702.

COLES, S. **An introduction to statistical modeling of extreme values**. London: Springer, 2001.

COUTINHO, M. D.L.; COSTA, M. S.; GOMES, A. C. S.; MORAIS, M. D. C.; JACINTO, L. V.; LIMA, K. C.; SAKAMOTO, M. S. Estudo de Caso: Evento extremo no estado do Ceará entre os dias 04 e 04 de janeiro de 2015. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 182-198, 2017.

CUNHA, A. C.; VILHENA, J. E. S.; SANTOS, E. S. ...[et al.,]. Evento extremo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Araguari, Amapá, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 95-110, 2014.

DELGADO, R. C.; SOUZA, L. P. Tendência da precipitação e seu aproveitamento para fins não potáveis na Amazônia Ocidental, Acre. **Nativa**, v. 02, n. 04, p. 108-113, 2014.

DU, T.; XIONG, L.; CHU, C. Y.; GIPPEL, C. J.; GUO, S.; LIU, P. Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 234-250, 2015.

DUARTE A. F. Variabilidade e tendência das chuvas em Rio Branco, Acre, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.1, p.37-42, 2005.

DUARTE, A. F. Climatologia das Chuvas e Efeitos Antrópicos da Urbanização na Bacia do Rio Acre, Amazônia Ocidental. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes/RJ, v.11 n.1, p. 199-213, jan./jun. 2017.

DUARTE, A. F. Aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971-2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, 308-317, 2006.

ELY, D. F.; DUBREUIL, V. Análise de tendências espaço-temporais das precipitações anuais para o estado do Paraná-Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 553-569.

FAN, F. M.; RAMOS, M. H.; COLLISCHONN, W. Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 914-926, 2015.

FARIAS, C. S.; PEREIRA, R. S.; LIMA, G. F.; SANTOS, J. S. As hepatites virais e as enchentes em um município amazônico. As hepatites virais e as enchentes em um município amazônico. Belo Horizonte: Atena, 2018.

FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, R. M.; MELO, V. S. M.; SANTOS, D. S. Probabilidades de ocorrência de chuvas para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 140-154, 2015.

GUEDES, H. A. S.; PRIEBE, P. S.; MANKE, E. B. Tendências em Séries Temporais de Precipitação no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 283-291, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades**. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ac/rio-branco/panorama>>. Acesso em: 22 de ago. de 2019.

ISHAK, E. H.; RAHMAN, A.; WESTRA, S.; SHARMA, A.; KUCZERA, G. Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. **Journal of Hydrology**, v. 494, p. 134-145, 2013.

JHA, A. K.; BLOCH, R. LAMOND, J. **Cidades e inundações. Um guia para a Gestão Integrada do Risco de inundação urbana para o século XXI: Um resumo para os formuladores de políticas**. Washington: The World Bank, 2012.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 25, p. 1287-1304, 2002.

Katz, R.W. Statistics of extremes in climate change. **Climatic change**, v. 100, p. 71-76, 2010.

KENDALL, M. G. **Rank correlation Methods**. 4.ed. Londres: Charles Griffin, 1975.

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, C. E. M (org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012, p.79-176.

LIMA, F. N. **Avaliação das probabilidades de falhas em barragens, associadas eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: estudo de caso na PCH Cajuru**. 2014. 147 f. dissertação

de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG, Belo Horizonte, 2014.

LOUREIRO, R. S.; SARAIVA, J. M.; SARAIVA, I.; SENNA, R. C.; FREDÓ, A. S. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no Estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 83-94, 2014.

LOPÉZ, J.; FRANCÉS, F. Non-Stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indexes as external covariates. **Hydrology and Earth System Science**, v. 17, p. 3189-3203, 2013.

MACÊDO, M. N. C.; DIAS, H. C. T.; COELHO, F. M. G.; ARAÚJO, E. A. SOUZA, M. L. H.; SILVA, E. Precipitação pluviométrica e vazão da bacia hidrográfica do Riozinho do Rôla, Amazônia Ocidental. **Ambi-Água**, v. 8, n. 1, p. 206-221, 2013.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometria**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. Santa Maria: INPE, 2008.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 83-96, 2008.

MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009.

MCPHILLIPS, L. E.; CHANG, H.; CHESTER, M.V.; DEPIETRI, Y.; FRIEDMAN, E.; GRIMM, N. B.; KOMINOSKI, J.S.; MCPHEARSON, T.; MÉNDEZ-LÁZARO, P.; ROSI E. J.; SHIVA, J. S. Defining Extreme Events: A Cross-Disciplinary Review. **Earth's Future**. V. 6, p. 441–455, 2018.

MIGUEZ, M. G.; DI GREGORIO, L. T.; VERÓL, A. P. **Riscos e Desastres Hidrológicos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres**. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/>>. Acesso em: 10 de maio de 2019.

MIZUKAMI, N.; SMITH, M. B. Analysis of inconsistencies and its impact on hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, v. 429, p. 388-400, 2012.

MOREIRA, J. G. V. **Método para análise de frequência e de gestão do risco de cheias, a partir da informação hidrometeorológica, sob a condição de não-estacionariedade**. 2016. 185 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG, Belo Horizonte, 2016.

MOREIRA, J. G. V.; AQUINO, A. P. V.; MESQUITA, A. A.; MUNIZ, M. A.; SERRANO, R. O. P. Stationary in annual daily maximum streamflow series in the upper Juruá River, western Amazon. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 02, p. 705-713, 2019.

MOREIRA, J. G. V.; CRAVEIRO, R. L.; SERRANO, R. O. P.; FORMOLO, A. K. Temporal trend and frequency of maximum precipitations in Cruzeiro do Sul, Acre, Brasil. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 97-102, 2016a.

MOREIRA, J. G. V.; NAGHETTINI, M.; ELEUTÉRIO, J. C. Frequência e risco sob não-estacionariedade em registros pluviométricos da bacia do alto rio Tarauacá, Acre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 232-241, 2016b.

MOREIRA, J. G. V.; NAGHETTINI, M. Detecção de tendências monotônicas temporais e relação com os erros dos tipo I e II: Estudo de caso em séries de precipitações diárias máximas anuais do estado do Acre. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 394-402, 2016.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

- NEGRÃO, A. C.; LEITE, E.; BRENDA, A. Previsão Hidrológica probabilística derivada da modelagem dos erros da aproximação Meta-Gaussiana. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013. Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- NOORTWIJK, J. M.; van der WEIDE, J. A. M.; KALLEN, M. J.; PANDEY, M. D. Gamma processes and peaks-over-threshold distributions of time-dependent reliability. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, n. 12, p. 1651-1658, 2007.
- NUNES, A. A.; PINTO, E. J. A.; BAPTISTA, M. B. Detection of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, e9, 2018.
- OBEYSEKERA, J.; SALAS, J. D. Quantifying the uncertainty of design floods under nonstationary conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 3, p. 1438-1446, 2014.
- OGIRAMOI, P. N.; WILLEMNS, P.; KATASHAYA, G. N. Trend and variability in observed hydrometeorological extremes in the Lake Victoria basin. **Journal of Hydrology**, v. 489, p. 56-73, 2013.
- OSCAR JUNIOR, A. C. S. Extremos atmosféricos e desastres hidrometeorológicos em Duque de Caxias (RJ). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 189-2015, 2015.
- PAIVA, C. S. M.; FREIRE, D. M. C.; CECATTI, J. G. Modelos aditivos generalizados de posição, escala e forma (GAMLSS) na modelagem de curvas de referência. **Revista Brasileira de Ciências da Saúde**, v. 12, n. 3, p. 289-310, 2008.
- PAPALEXIOU, S. M. e KOUTSOYIANNIS, D. The battle of extreme distributions: a global survey on the extreme daily rainfall. **Water Resources Research**, v. 49, n. 1, p. 187-201, 2013.
- PEREIRA, D. M.; SZLAFSZTEIN, C. F. Ameaças e desastres naturais na Amazônia Sul Ocidental: Análise da bacia do rio Purus. **Revista Raega**, v. 35, p. 68-94, 2015.
- PEREIRA, M. C.; ROCHA, J. R.; MENGUE, V. P. Comparação de índices de espacialização da cobertura vegetal arbórea dos bairros centro de duas metrópoles brasileiras: Belo Horizonte e Porto Alegre. **Revista Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 1, p. 106-125, 2010.
- PORTELA, M. M.; QUINTELA, A. C.; SANTOS, J. F.; VAZ, C.; MARTINS, C. Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. **Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Lisboa**, v. 32, n. 1, p. 43-60, 2011.
- QUADROS, L. E.; QUEIROZ, M. M. F.; VILAS BOAS, M. A. Distribuição de frequências e temporal de chuvas intensas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 401-410, 2011.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2019.
- RIO BRANCO. Prefeitura Municipal de Rio Branco. **Plano de contingência para hipótese de ocorrência de enchentes**. Rio Branco-Acre, 2017.

RIO BRANCO. Prefeitura Municipal de Rio Branco. **Plano de contingência para hipótese de ocorrência de enchentes**. Rio Branco-Acre, 2019.

RIO BRANCO. Prefeitura Municipal de Rio Branco. 2013. Disponível em: <<http://www.riobranco.ac.gov.br/index.php/rio-branco.html>>. Acesso em 17 de jun de 2019.

ROSENDO, Q.; ELDAN, E.; SOUZA, B. I.; LUCENA P. A.; PEDROSA L. P. D.; FILGUEIRA H. J. A. Chuvas extremas e desordenamento do território na construção do risco: um estudo de caso no município de Cabaceiras-Paraíba (Brasil). **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**. v. 4, n. 2. p.189-203. 2015.

ROOTZÉN, H.; KATZ, R. W. Design life level: Quantifying risk in a changing climate. *Water Resources Research*, v. 49, n. 9, p. 5964-5972, 2013.

SAITO, S. M.; DIAS, M. C. A.; ALVALÁ, R. C. S.; STENNER, C.; FRANCO, C. O.; RIBEIRO, J. V. M.; SOUZA, P. A.; SANTANA, R. A. S. M. População Urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. 1-25, 2019.

SALAS, J. D.; OBEYSEKERA, J. Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 3, p. 554-568, 2014.

SANTOS, C. A.; LIMA, A. M. M.; FARIAS, M. H. C. S.; AIRES, U. R. V.; SERRÃO, E. A. O. Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do rio pardo. **Holos**, v. 7, p. 179-193, 2016.

SANTOS, D. C.; MEDEIROS, R. M.; CORREIA SANTOS, D.; BRITO, J. I. B. Variabilidade climática de regiões pluviometricamente homogêneas na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 903-918, 2013.

SANTOS, M. A. C.; SILVA, D. F. Tendências temporais dos recursos hídricos na Sub-bacia hidrográfica do Médio Jaguaribe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 10, p. 2354-2363, 2016.

SANTOS, R. S.; VIEIRA, P. D.; EVANGELISTA, D. H. R.; OLIVEIRA, L. J. C.; NONATO, D. Caracterização de extremos mensais de precipitação em Cacoal (RO). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 267-280, 2018.

SENA, J.; FREITAS, M.; BERRÊDO, D.; FERNANDES, L. Evaluation of Vulnerability to Extreme Climatic Events in the Brazilian Amazonia: Methodological Proposal to the Rio Acre Basin. **Water Resources Management**, v. 26, p. 4553-4568, 2012.

SHADMANI, M.; MAROFI, S.; ROKNIAN, M. Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests in Arid Regions of Iran. **Water Resources Management**, v. 26, p. 211-224, 2012.

SHI, J.; CUI, L.; MA, Y.; DU, H.; WEN, K. Trends in temperature extremes and their association with circulation patterns in China during 1961-2015. **Atmospheric Research**, v. 212, p. 259-272, 2018.

SILVA, A. T.; PORTELA, M. M.; NAGHETTINI, M. Nonstationarities in the occurrence rates of flood events in Portuguese watersheds. **Hydrology and Earth System Sciences, Stuttgart**, v. 16, p. 241-254, 2012.

SILVA, D. F.; SOUZA, A. B. Detecção de tendências climáticas no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, p. 442-455, 2013.

SILVINO, A. N. O.; SILVEIRA, A.; MUSIS, C. R.; WYREPKOWSKI, C. C.; CONCEIÇÃO, F. T. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o Rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. **Geociências**, v. 26, n. 4, p. 369-378, 2007.

SPECTOR, PHIL. Data manipulation with R. New Your: Springer, 2008.

SOBRAL, A.; FREITAS, C. M.; ANDRADE, E. V.; LIRA, G. F. D.; MASCARENHAS, M. S.; ALENCAR, M. R. F.; CASTRO, R. A. L.; FRANÇA, R. F. Desastres naturais – sistemas de informação e vigilância: uma revisão da literatura. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, n. 19, n. 4, p. 389-402, 2010.

SOUZA, F. A. S.; VIEIRA, V. R.; SILVA, V. P. R.; MELO, V. S.; GUEDES, R. W. S. Estimativas dos riscos de chuvas extremas nas capitais do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 430-439, 2016.

SOUZA, S. A.; MATOS, B. A.; TROGER, F. H.; CARVALHO, T. L. L.; ARAUJO, A. A.; NÓBREGA, M. T.; PUFAL, M. I. Análise de estacionariedade de séries de vazões na bacia hidrográfica do rio Paraguai. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXI, 2015, Brasília. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento a da gestão**. Brasília: ABRH, 2015, p. 1-8.

TIBÚRCIO, L. H.; CORREA, M. P. Análise da vulnerabilidade na microrregião de Itajubá por meio do IVG com vistas à mitigação dos impactos causados pelas mudanças climáticas. **Ambiente & Sociedade**, v. 15, n. 3, p. 123-139, 2012.

TOMINAGA, L. K.; Desastres naturais: Por que ocorrem? In: TMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009, p. 13-23.

TUCCI, C. E. M. Variabilidade climática e o uso do solo na bacia brasileira do Prata. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003, p. 163-207.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. Clima e Recursos Hídricos. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003, p. 1-30.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. As múltiplas dimensões da crise hídrica. **Revista USP**, v. 106, p. 21-30, 2015.

ULIANA, E. M.; SILVA, D. D.; MORGAN ULIANA, ESTEVÃO; RODRIGUES, B. S.; CORRÊDO, L. P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, p. 82-88, 2015.

VILANOVA, M. R. N. Tendências hidrológicas na região do alto rio Mogi-Guaçu, Sul de Minas Gerais. **Revista Agrogeoambiental**, v. 6, n. 3, p. 63-70, 2014.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; NAPOLITANO, F. Nonstationary modeling of a long record of rainfall and temperature over Rome. **Advances in Water Resources, Iowa**, v. 33, p. 1256-1267, 2010.

YUAN, J.; EMURA, K.; FARNHAM, C.; ALAM, M. A. Frequency analysis of annual maximum hourly precipitation and determination of best fit probability distribution for regions in Japan. **Urban Climate**, v. 24, p. 276-286, 2018.

YUE, S. The Gumbel Mixed Model Applied to Storm Frequency Analysis. **Water Resources Management**, v. 14, p. 377-389, 2000.

## APÊNDICE A

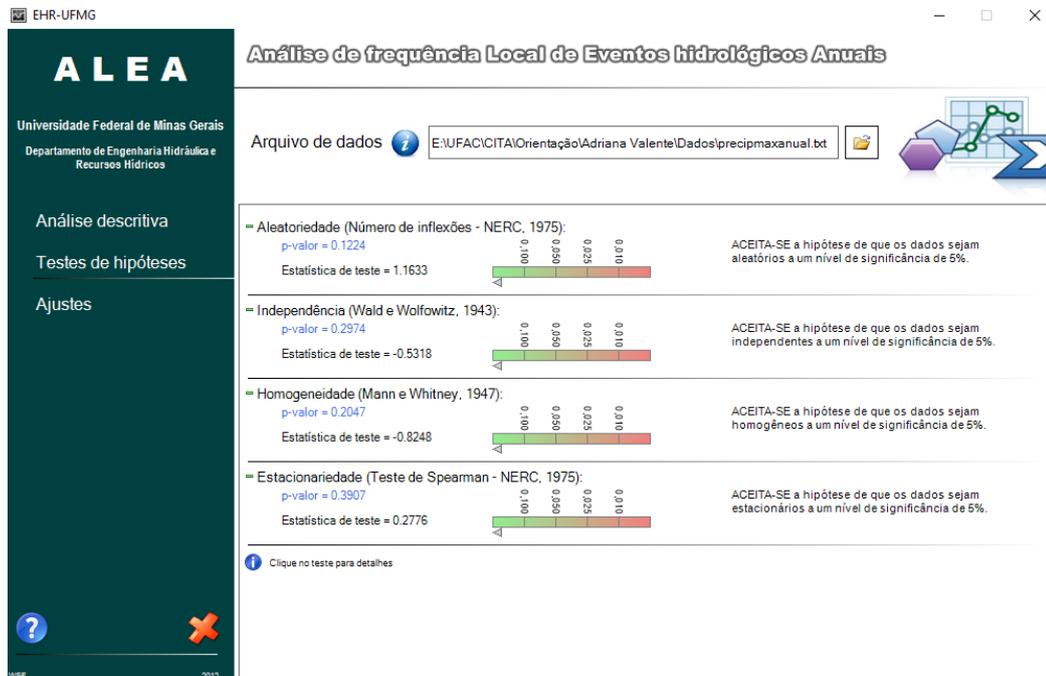
Série histórica das enchentes/inundações em Rio Branco (1971-2018)

Ano	Nível (m)	Data	< 14,00m (sem inundação)	14,00m a 15,00m (pequena inundação)	15,00m a 16,00m (média inundação)	16,00m a 17,00m (grande inundação)	> 17,00m (inundação extraordinária)
1971	16,29	25/fev					
1972	16,23	01/mar					
1973	14,75	23/fev					
1974	16,86	04/mar					
1975	14,00	22/mar					
1976	15,36	17/fev					
1977	15,20	15/jan					
1978	16,90	26/dez					
1979	16,37	29/mar					
1980	11,37	26/mar					
1981	14,42	26/mar					
1982	15,57	28/fev					
1983	13,53	23/mar					
1984	16,13	12/abr					
1985	14,87	28/abr					
1986	15,72	09/fev					
1987	12,34	19/jan					
1988	17,12	17/fev					
1989	14,18	13/fev					
1990	14,34	06/jan					
1991	15,82	28/jan					
1992	13,22	27/mar					
1993	14,28	11/mar					
1994	14,90	13/abr					
1995	15,15	21/mar					
1996	14,04	29/mar					
1997	17,66	14/mar					
1998	13,86	07/dez					
1999	15,96	21/jan					
2000	12,03	22/fev					
2001	14,48	07/mar					
2002	14,48	22/fev					
2003	13,36	04/mar					
2004	14,22	17/fev					
2005	14,42	23/fev					
2006	16,72	21/fev					

2007	13,54	25/fev					
2008	13,89	08/abr					
2009	15,50	15/abr					
2010	15,55	07/mar					
2011	16,16	17/abr					
2012	17,64	26/fev					
2013	15,33	28/mar					
2014	16,77	12/mar					
2015	18,40	04/mar					
2016	11,29	03/mar					
2017	13,24	27/mar					
2018	14,25	20/fev					
Total parcial dos eventos			Sem enchente	Pequena	Média	Grande	Extraordinária
			11	14	10	9	4
Total			48				

## APÊNDICE B

### Testes de pressupostos para a análise de frequência dos dados de **precipitação diária máxima anual** em Rio Branco

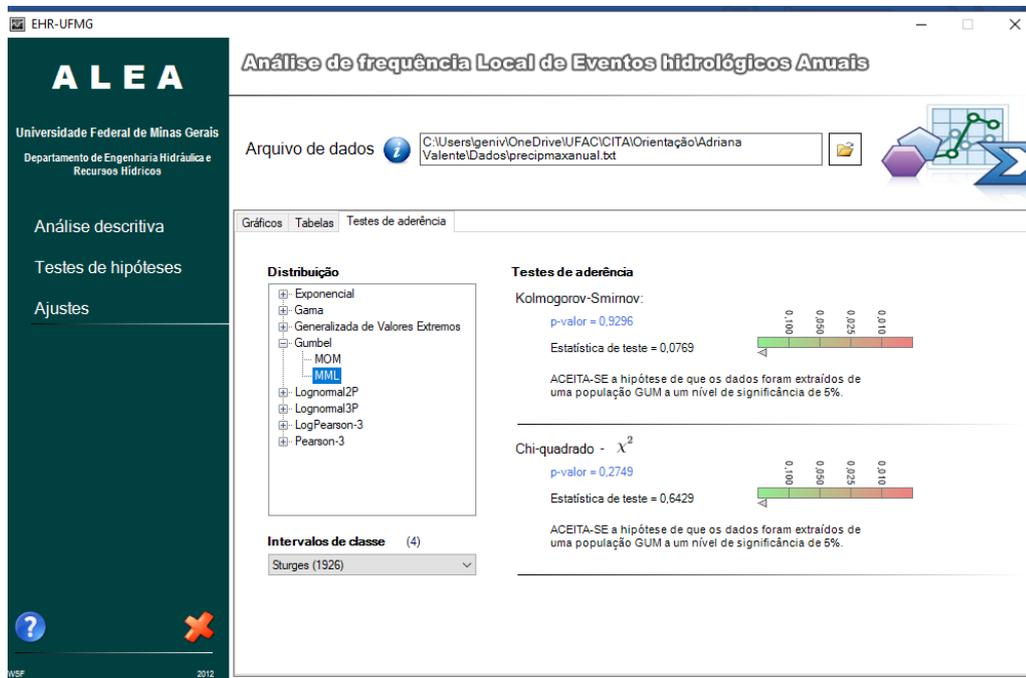


### Testes de pressupostos para a análise de frequência dos dados de **vazão diária máxima anual** em Rio Branco

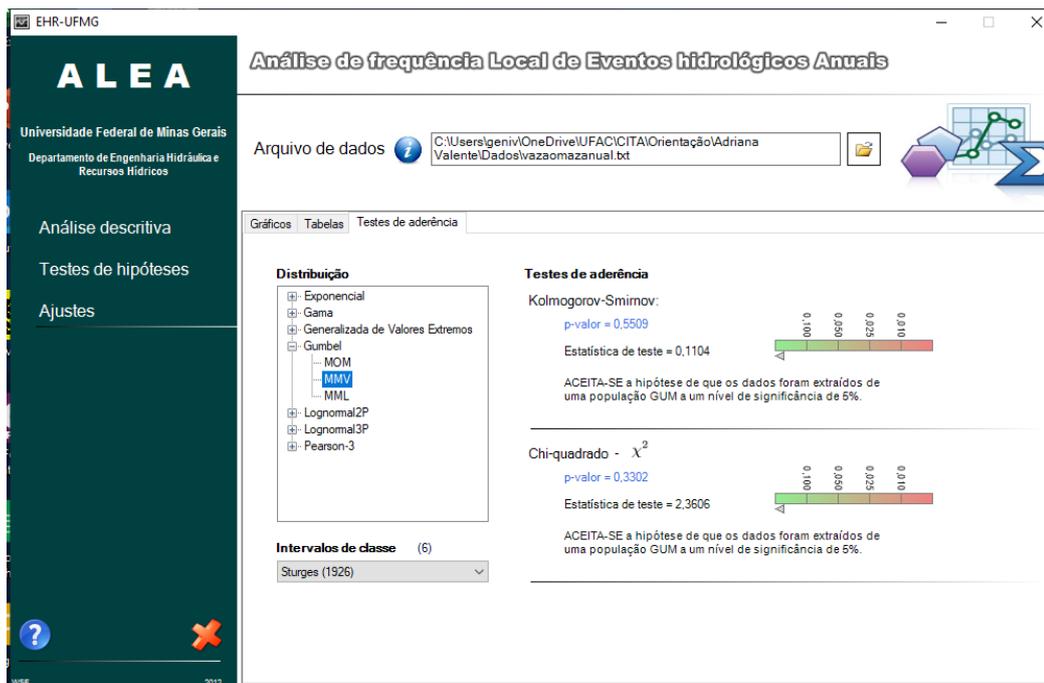


## APÊNDICE C

### Testes de aderência à distribuição de Gumbel para máximos dos dados de **precipitação diária máxima anual** em Rio Branco



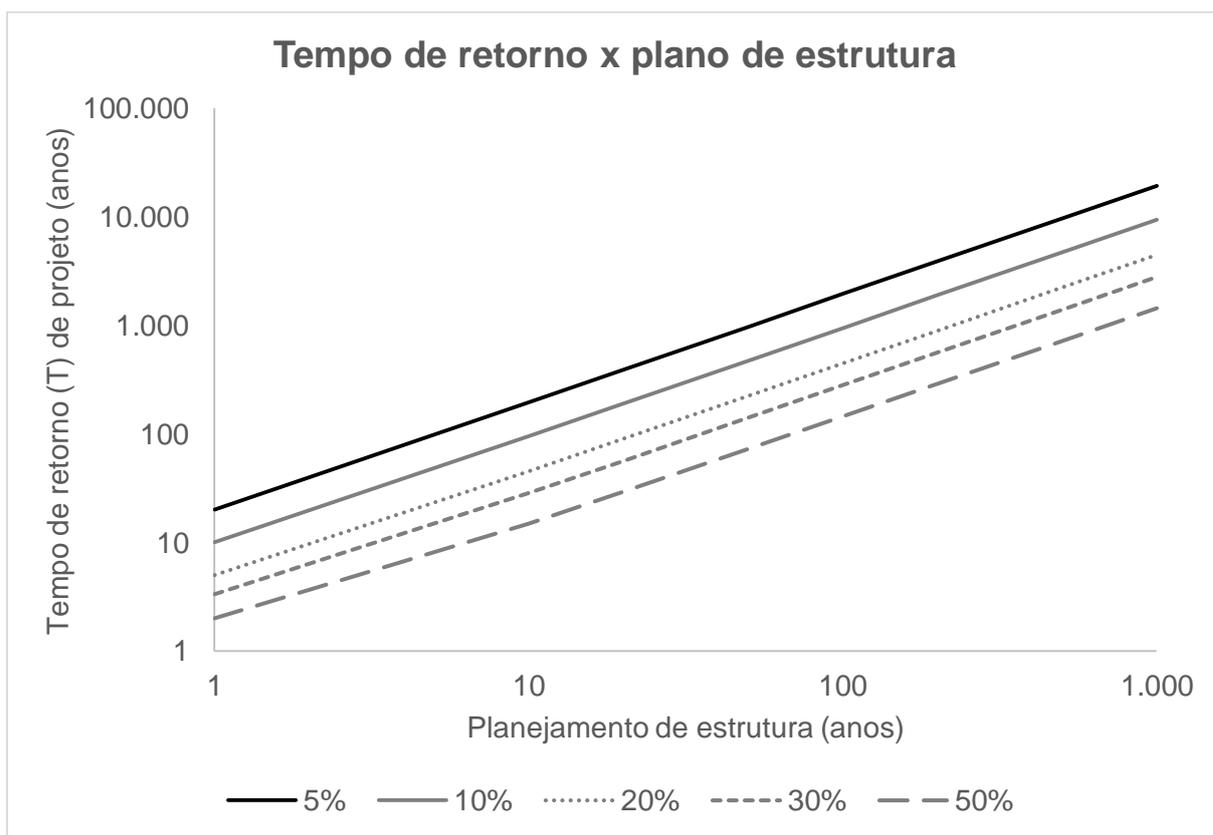
### Testes de aderência à distribuição de Gumbel para máximos dos dados de **vazão diária máxima anual** em Rio Branco



## APÊNDICE D

Relação entre tempo de retorno e período de vida útil para planejamento de estruturas em diferentes níveis de risco hidrológico para a cidade de Rio Branco, Acre.

R 5%		R 10%		R 20%		R 30%		R 50%	
anos	T	anos	T	anos	T	anos	T	anos	T
1	20	1	10	1	5	1	3	1	2
10	195	10	95	10	45	10	29	10	15
20	390	20	190	20	90	20	57	20	29
50	975	50	475	50	225	50	141	50	73
100	1.950	100	950	100	449	100	281	100	145
200	3.900	200	1.899	200	897	200	561	200	289
500	9.748	500	4.746	500	2.241	500	1.402	500	722
1.000	19.496	1.000	9.492	1.000	4.482	1.000	2.804	1.000	1.443

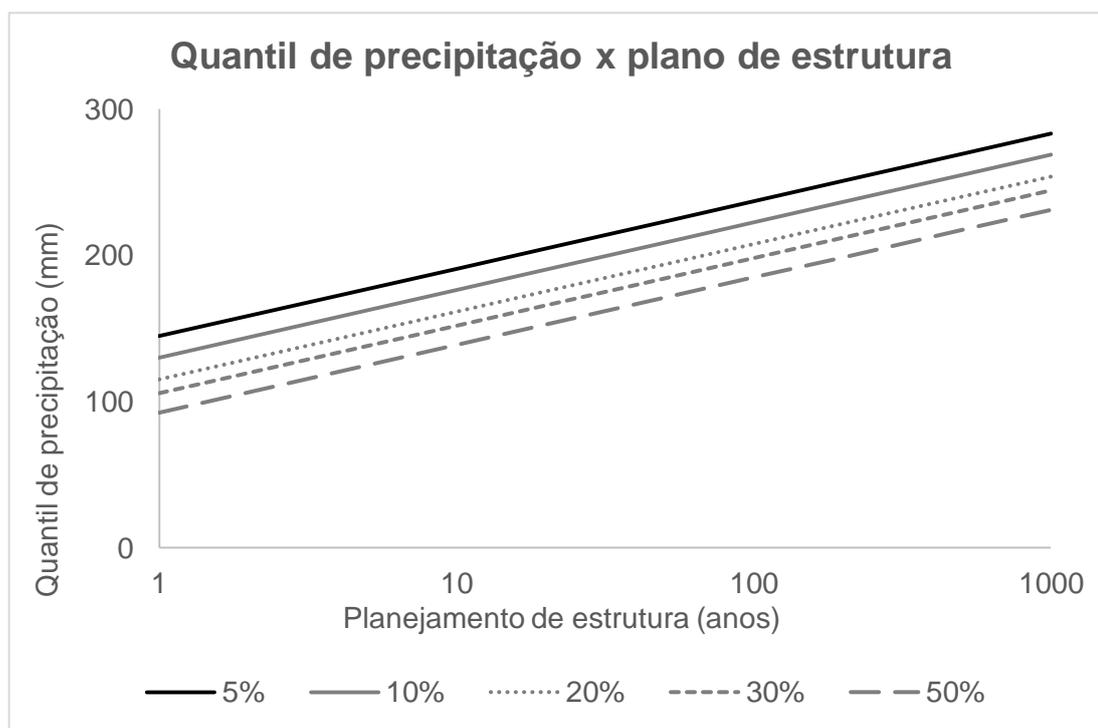


Relação entre quantil de precipitação e período de vida útil para planejamento de estruturas em diferentes níveis de risco hidrológico para a cidade de Rio Branco, Acre.

R 5%			R 10%			R 20%		
anos	T	Quantil	anos	T	Quantil	anos	T	Quantil
1	20	144,67	1	10	130,21	1	5	115,13
10	195	190,92	10	95	176,46	10	45	161,39
20	390	204,85	20	190	190,39	20	90	175,31
50	975	223,26	50	475	208,80	50	225	193,72
100	1.950	237,18	100	950	222,72	100	449	207,65
200	3.900	251,11	200	1.899	236,65	200	897	221,57
500	9.748	269,51	500	4.746	255,05	500	2.241	239,98
1000	19.496	283,44	1000	9.492	268,98	1000	4.482	253,90

R 30%			R 50%		
anos	T	Quantil	anos	T	Quantil
1	3	105,71	1	2	92,36
10	29	151,97	10	15	138,62
20	57	165,89	20	29	152,54
50	141	184,30	50	73	170,95
100	281	198,22	100	145	184,88
200	561	212,15	200	289	198,80
500	1.402	230,56	500	722	217,21
1000	2.804	244,48	1000	1.443	231,13

mu	85,000
sigma	20,089

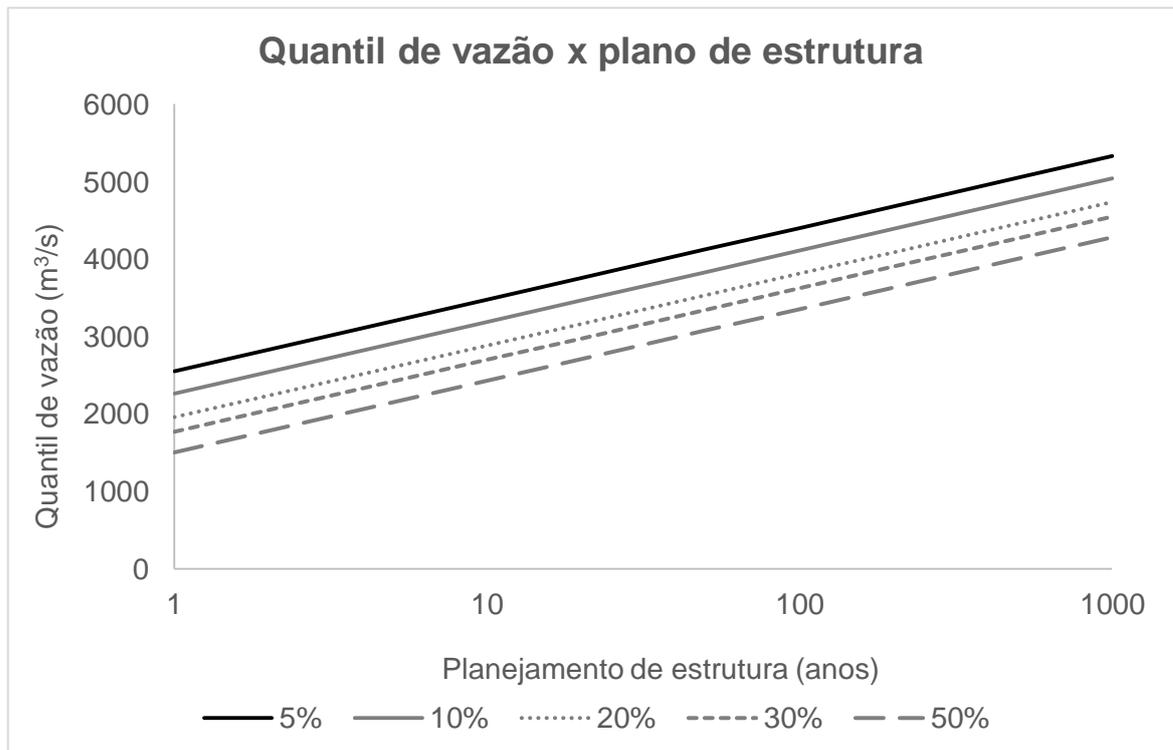


Relação entre quantil de vazão e período de vida útil para planejamento de estruturas em diferentes níveis de risco hidrológico para a cidade de Rio Branco, Acre.

R 5%			R 10%			R 20%		
anos	T	Quantil	anos	T	Quantil	anos	T	Quantil
1	20	2.548,90	1	10	2.259,29	1	5	1.957,37
10	195	3.475,30	10	95	3.185,69	10	45	2.883,77
20	390	3.754,17	20	190	3.464,56	20	90	3.162,64
50	975	4.122,82	50	475	3.833,21	50	225	3.531,29
100	1.950	4.401,70	100	950	4.112,09	100	449	3.810,17
200	3.900	4.680,57	200	1.899	4.390,96	200	897	4.089,04
500	9.748	5.049,22	500	4.746	4.759,61	500	2.241	4.457,69
1000	19.496	5.328,10	1000	9.492	5.038,49	1000	4.482	4.736,57

R 30%			R 50%		
anos	T	Quantil	anos	T	Quantil
1	3	1.768,67	1	2	1.501,36
10	29	2.695,07	10	15	2.427,76
20	57	2.973,94	20	29	2.706,63
50	141	3.342,60	50	73	3.075,28
100	281	3.621,47	100	145	3.354,16
200	561	3.900,34	200	289	3.633,03
500	1.402	4.269,00	500	722	4.001,68
1000	2.804	4.547,87	1000	1.443	4.280,56

mu	1.353,896
sigma	402,330



## APÊNDICE E

Script para ajuste da distribuição de Gumbel aos dados de **precipitação** diária máxima anual na cidade de Rio Branco, Acre, realizada no Software R Team.

```
setwd("diretório onde os dados estão salvos")

precipmaxanual<-read.csv("precipmaxanual.csv", header = TRUE,
sep = ";", dec = ",")

precipmaxanual

require(ismev)

ano<-precipmaxanual$ano

ano

precip<-precipmaxanual$maxanual

precip

gum<-gum.fit(precip)

ls(gum)

gum$mle

posicao=85.00235

escala=20.08887

#tr é p tempo de retorno

tr<-c(2,5,10,25,69,100,200,500,1000)

quantil<-posicao-escala*log(-log(1-1/tr))

quantil
```

Script para ajuste da distribuição de Gumbel aos dados de **vazão** diária máxima anual na cidade de Rio Branco, Acre, realizada no Software R Team.

```
setwd("diretório onde os dados estão salvos")

vazaomaxanual<-read.csv("vazaomaxanual.csv", header = TRUE,
sep = ";", dec = ",")

vazaomaxanual

require(ismev)

ano<-vazaomaxanual$ano

ano

vazao<-vazaomaxanual$vazao

gum<-gum.fit(vazao)

ls(gum)

gum$mle

posicao=1353.8960

escala=402.3304

#tr é p tempo de retorno

tr<-c(2,5,10,25,69,100,200,500,1000)

quantil<-posicao-escala*log(-log(1-1/tr))

quantil
```

Script para Teste de Tendência para os dados de **precipitação** diária máxima anual na cidade de Rio Branco, Acre, realizada no Software R Team.

```
setwd("diretório onde os dados estão salvos")

precipmaxanual.a<-read.csv("precipmaxanual.csv", header =
TRUE, sep = ";")

precipmaxanual.a

ano<-precipmaxanual.a$ano

ano

maxanual<-precipmaxanual.a$maxanual

maxanual

length(ano)

length((maxanual))

require(Kendall)

mkrbano<-MannKendall(maxanual)

mkrbano

summary(mkrbano)

ls(mkrbano)

mkrbano$D

mkrbano$S

mkrbano$sl

mkrbano$tau

mkrbano$varS

zmk<-(mkrbano$S-1)/sqrt(mkrbano$varS)

zmk

#Resumo da Análise

cat("\n Resumo da Análise pelo package Kendall", "\n p-valor
=", mkrbano$sl, "\n Zmk =", zmk)
```

```

#Resolução por meio do Package Trend
require(trend)
require(trendchange)
mkrb.a<-mk.test(maxannual)
mkrb.a
ls(mkrb.a)
cat("\n Resumo da Análise pelo package Trend", "\n p-valor =",
mkrb.a$p.value, "\n Zmk =", mkrb.a$statistic)
#Teste de Spearman (conferir no Excel)
correl<-cor.test(x=ano, y=maxannual, method = 'spearman')
correl
ls(correl)
var<-1/(length(maxannual))
var
tcalc<-abs(correl$estimate/sqrt(var))
tcalc
dnorm(tcalc)

```

Script para Teste de Tendência para os dados de **precipitação** diária máxima anual na cidade de Rio Branco, Acre, realizada no Software R Team.

```
setwd("diretório onde os dados estão salvos ")
dir()
vazaomaxannual.a<-read.csv("vazaomaxannual.csv", header = TRUE,
sep = ";")
vazaomaxannual.a
ano<-vazaomaxannual.a$ano
ano
vazaomaxannual<-vazaomaxannual.a$vazao
vazaomaxannual
length(ano)
length((vazaomaxannual))
require(Kendall)
vzmkrbano<-MannKendall(vazaomaxannual)
vzmkrbano
summary(vzmkrbano)
ls(vzmkrbano)
vzmkrbano$D
vzmkrbano$S
vzmkrbano$sl
vzmkrbano$tau
vzmkrbano$varS
zmk<-(vzmkrbano$S-1)/sqrt(vzmkrbano$varS)
zmk
#Resumo da Análise
```

```

cat("\n Resumo da Análise pelo package Kendall", "\n p-valor
=", vzmkrbano$sl, "\n Zmk =", zmk)

#Resolução por meio do Package Trend

require(trend)

require(trendchange)

mkrb.a<-mk.test(vazaomaxannual)

mkrb.a

ls(mkrb.a)

cat("\n Resumo da Análise pelo package Trend", "\n p-valor =",
mkrb.a$p.value, "\n Zmk =", mkrb.a$statistic)

#Teste de Spearman (conferir no Excel)

correl<-cor.test(x=ano, y=vazaomaxannual, method = 'spearman')

correl

ls(correl)

var<-1/(length(vazaomaxannual))

var

tcalc<-abs(correl$estimate/sqrt(var))

tcalc

dnorm(tcalc)

```