



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA



ESCOLA DE MINAS

Stéphanie Silva Soares

**Efeito das mudanças climáticas sobre a frequência de
ocorrência de chuvas intensas na Sub-Bacia Cotia-
Guarapiranga – São Paulo**

Ouro Preto

2026

Stéphanie Silva Soares

Efeito das mudanças climáticas sobre a frequência de
ocorrência de chuvas intensas na Sub-Bacia Cotia-
Guarapiranga – São Paulo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharela em Engenharia Urbana.

Áreas de concentração: Recursos Hídricos e Planejamento Urbano

Orientadora: Prof.^a D.Sc. Marina Neves Merlo

Coorientadora: M.Sc. Pâmela Rafanele França Pinto

Ouro Preto

2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Stéphanie Silva Soares

Efeito das mudanças climáticas sobre frequência de ocorrência de chuvas intensas na
sub-bacia Cotia-Guarapiranga – São Paulo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharela

Aprovada em 30 de julho de 2026

Membros da banca

D.Sc. Marina Neves Merlo - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.Sc. Pâmela Rafanele França Pinto - Coorientadora (Universidade Federal de Lavras)
D.Sc. Aline de Araújo Nunes - (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.Sc. Thalissa de Oliveira Pires Magalhães - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Marina Neves Merlo, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/09/2026



Documento assinado eletronicamente por **Denis Furstenau Plec, COORDENADOR(A) DE CURSO DE ENGENHARIA URBANA**, em 21/10/2026, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1209240** e o código CRC **E4FA53B5**.

*"All your life,
You were only waiting for this moment to arise."
— The Beatles (Blackbird)*

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial, meus pais, Jacqueline e Márcio, e minha irmã, Beatriz, pelo apoio incondicional, pelo amor e por compreenderem as minhas ausências nos momentos de estudos. Esta conquista também é de vocês.

À minha orientadora e minha coorientadora, Prof.^a D.Sc. Marina Neves Merlo e M.Sc. Pâmela Rafanele França Pinto, pela paciência, contribuições valiosas, revisões minuciosas e por acreditarem no meu potencial do início ao final deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto e todo o corpo docente do curso de Engenharia Urbana, que me proporcionaram uma formação sólida, crítica e humana, preparando-me para os desafios do mundo real.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e por tornarem a vida universitária em Ouro Preto um período inesquecível.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que a realização deste sonho fosse possível, o meu muito obrigada.

RESUMO

As alterações climáticas globais têm intensificado o ciclo hidrológico, resultando no aumento da frequência de eventos extremos de precipitação, o que compromete a segurança hídrica e a resiliência das infraestruturas urbanas. Neste contexto, objetivou-se por meio deste estudo analisar o comportamento das chuvas intensas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga, unidade estratégica para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. Para isso, foi realizada a caracterização de chuvas diárias observadas (≥ 50 mm e ≥ 100 mm) entre 1990 e 2014. O desempenho dos modelos climáticos globais HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 foi avaliado por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson entre os dados observados e simulados em escala diária para o período histórico (1990 – 2014). Posteriormente, realizou-se a análise das projeções futuras para dois cenários climáticos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e três horizontes temporais (2026 - 2050, 2051 - 2075, 2076 - 2100). Os resultados da validação indicaram que, embora os modelos apresentem correlação moderada com os dados diários, eles subestimam a frequência de eventos ≥ 50 mm e não reproduzem lâminas ≥ 100 mm no clima presente. As projeções futuras apontam para um aumento de ocorrências ≥ 50 mm em 2026 - 2050, seguido de estabilização em 2051 - 2075, com projeção de incremento médio de 2,6 vezes no final do século XXI (2076 - 2100) sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5) em relação ao SSP2-4.5. Sendo assim, evidencia-se a necessidade de integração de medidas de adaptação climática nas diretrizes de planejamento urbano e gestão dos recursos hídricos, alinhada às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, para reduzir a vulnerabilidade socioambiental da população.

Palavras-chaves: Cenários climáticos futuros; Eventos Extremos de Precipitação; Modelos Climáticos Globais; Região Metropolitana de São Paulo

ABSTRACT

Global climate change has intensified the hydrological cycle, resulting in an increased frequency of extreme precipitation events, which compromises water security and the resilience of urban infrastructure. In this context, this study aimed to analyze the behavior of heavy rainfall in the Cotia-Guarapiranga sub-basin, a strategic unit for the water supply of the São Paulo Metropolitan Region. For this purpose, observed daily rainfall (≥ 50 mm and ≥ 100 mm) was characterized between 1990 and 2014. The performance of the global climate models HadGEM3-GC31-LL and MIROC6 was evaluated using Pearson's linear correlation coefficient between observed and simulated data on a daily scale for the historical period (1990–2014). Subsequently, future projections were analyzed for two climate scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) across three-time horizons (2026–2050, 2051–2075, and 2076–2100). Validation results indicated that, although the models show moderate correlation with daily data, they underestimate the frequency of events ≥ 50 mm and fail to reproduce rainfall depths ≥ 100 mm in the present climate. Future projections indicate an initial increase in occurrences ≥ 50 mm during 2026–2050, followed by stabilization in 2051 - 2075, culminating in a possible average increase of 2.6 times by the end of the century (2076 - 2100) under the high-emissions scenario (SSP5-8.5) relative to SSP2-4.5. Thus, the need to integrate climate adaptation measures into urban planning guidelines and water resource management becomes evident, aligning with the 2030 Agenda targets to reduce the population's socio-environmental vulnerability.

Keywords: Future climate scenarios; Extreme precipitation events; Global Climate Models; São Paulo Metropolitan Region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga e das estações pluviométricas utilizadas neste estudo.....	14
Figura 2 - Uso e cobertura da terra da sub-bacia Cotia-Guarapiranga no ano de 2012.	15
Figura 3 - Mapa de localização das estações pluviométricas selecionadas.....	17
Figura 4- Comparação entre dados observados e simulados (MIROC6 e HadGEM3-GC31-LL) para precipitações diárias iguais ou maiores a 50 mm, por estação pluviométrica, para os anos de 1990 a 2014.....	23
Figura 5 - Médias dos números de ocorrências para lâminas de precipitação iguais ou maiores que 50 mm para o modelo MIROC6.....	32
Figura 6 - Médias dos números de ocorrências para lâminas de precipitação iguais ou maiores que 50 mm para o modelo HADGEM3-LL.....	32
Figura 7 – Número de eventos de precipitação iguais ou maiores que 50 mm, separados por célula climática do modelo MIROC6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.....	33
Figura 8 – Número de eventos de precipitação iguais ou maiores que 50 mm, separados por célula climática do modelo HadGEM3-GC31-LL para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equivalência entre os cenários de CMIP5 e CIMP6.	12
Tabela 2 - Estações pluviométricas selecionadas na Sub-Bacia Cotia-Guarapiranga.	16
Tabela 3 - Correlação de Pearson (r) entre os dados de precipitação diária observada e estimada pelos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 para as estações pluviométricas selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.	20
Tabela 4 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações maiores ou iguais que 50 e 100 mm dos dados observados e dos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 para as estações pluviométricas selecionadas, na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga, para o período histórico (1990-2014).	22
Tabela 5 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações maiores ou iguais que 50 e 100 mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos MIROC6 e HadGEM3-GC31-LL no período de 2026 a 2050 para as estações selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.	25
Tabela 6 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações maiores ou iguais que 50 e 100 mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 no período de 2051 a 2075 para as estações selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.	28
Tabela 7 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações maiores ou iguais que 50 e 100 mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 no período de 2076 a 2100 para as estações selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.	30

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo geral.....	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
2. Referencial teórico	3
2.1. Ciclo hidrológico e Mudanças Climáticas Globais	3
2.2. Eventos extremos de precipitação e Chuvas intensas	5
2.3. Mudanças Climáticas e a Agenda 2030: Desafios para a Segurança Hídrica e Resiliência Urbana	8
2.4. Modelos Climáticos Globais e Projeções Climáticas	10
3. Metodologia	14
4. Resultados e Discussão.....	20
5. Conclusão	35
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	36
Referências.....	37
APÊNDICE A - Repositório digital dos dados coletados.....	43

1. Introdução

O ciclo hidrológico atua como um elemento estrutural do equilíbrio ambiental e da estabilidade climática, sendo responsável pela regulação da disponibilidade hídrica nos ecossistemas e pela redistribuição de massa e energia no planeta (Callera et al., 2023; IPCC, 2021). Contudo, a aceleração das mudanças climáticas globais e as crescentes alterações no uso e cobertura da terra têm afetado a dinâmica desse ciclo, intensificando a variabilidade atmosférica e modificando os padrões de precipitação, temperatura, vazões e a ocorrência de eventos extremos (Almazroui et al., 2021; Marengo et al., 2020).

Esse cenário de desequilíbrio é impulsionado, em escala global, pela elevação das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera (Nobre et al., 2016) e, em escala local, por transformações no uso da terra, como o desmatamento e a expansão urbana, que alteram os padrões de evapotranspiração, a capacidade de infiltração e o transporte de umidade atmosférica (Coe et al., 2009; Callera et al., 2023).

Diante dessas transformações, o planejamento urbano e a gestão integrada dos recursos hídricos tornam-se indispensáveis para assegurar a segurança hídrica. Para avaliar possíveis cenários futuros e embasar políticas de adaptação e planejamento ambiental e urbano, utilizam-se os Modelos Climáticos Globais (Chou et al., 2014; Queiroz et al., 2015; Sousa et al., 2019). Entre essas ferramentas, destacam-se o *Hadley Centre Global Environment Model version 3* (HadGEM3-GC31-LL) e o *Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6* (MIROC6), que simulam a resposta do sistema climático frente a diferentes trajetórias de emissões.

As projeções climáticas se diferenciam das previsões meteorológicas determinísticas por não buscarem prever o estado exato do tempo em uma data específica a partir de condições atmosféricas iniciais, mas sim por estimarem cenários possíveis do clima condicionados a diferentes trajetórias socioeconômicas e de emissões de gases do efeito estufa. No contexto brasileiro, essas projeções indicam uma transição para regimes pluviométricos mais erráticos, em que eventos extremos de seca ou cheia, antes considerados raros, passam a exibir tempos de retorno reduzidos, colocando à prova a resiliência dos sistemas socioambientais (Medeiros, 2024).

Nesse panorama, a Sub-Bacia Hidrográfica Cotia-Guarapiranga sobressai como uma unidade de análise, vista sua relevância estratégica no abastecimento de aproximadamente quatro milhões de habitantes na Região Metropolitana de São Paulo (São Paulo, 2011), onde a intensa urbanização amplifica a vulnerabilidade a inundações e à escassez hídrica. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar as frequências de ocorrência de eventos de chuvas intensas considerando o clima presente e as projeções climáticas futuras na Sub-Bacia Cotia-Guarapiranga.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os regimes de precipitação e a frequência de ocorrência de chuvas intensas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.

1.1.2. Objetivos específicos

- Avaliar a capacidade dos modelos globais do CMIP6, HadGEM3-GC31-LL e MIROC6, em representar o regime de precipitação e a ocorrência de chuvas intensas na área de estudo no período histórico (1990 – 2014);
- Analisar a concordância entre as precipitações simuladas pelos modelos climáticos e os dados observados, identificando suas potencialidades e limitações na representação das condições locais; e
- Investigar possíveis alterações na frequência de ocorrência em diferentes horizontes futuros (2026 – 2050; 2051 – 2075; 2076 – 2100) e cenários de mudanças climáticas (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

2. Referencial teórico

2.1. Ciclo hidrológico e Mudanças Climáticas Globais

O ciclo hidrológico é o conjunto de processos naturais responsáveis pela circulação contínua da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado pela energia radiante solar em conjunto com a gravidade e a rotação da Terra (Martins *et al.*, 2010). Esse ciclo regula a disponibilidade hídrica nos ecossistemas, sustenta a vida, influencia o clima e condiciona atividades humanas como o abastecimento de água, a agricultura e a geração de energia. Ao redistribuir a água no tempo e no espaço, o ciclo hidrológico atua como um elemento-chave do equilíbrio ambiental e da estabilidade climática, tornando-se especialmente relevante para compreender como alterações nas condições atmosféricas e no uso da terra podem modificar padrões de chuva, vazões e eventos extremos (Fritzen *et al.*, 2011).

Dessa forma, o ciclo inicia-se com a evaporação, composta por um conjunto de fenômenos físicos em que a água em estado líquido é transformada em vapor devido à radiação solar. Uma vez na atmosfera, a massa de ar úmido ascende e passa por um resfriamento adiabático. Ao atingir o ponto de saturação e a temperatura de ponto de orvalho, o vapor d'água condensa-se em torno de núcleos de condensação atmosféricos, dando origem às nuvens. Pelo mecanismo de coalescência, essas microgotículas crescem progressivamente até que sua força de gravidade supere as correntes ascendentes que as mantêm suspensas, provocando a precipitação em estado líquido ou sólido (Martins *et al.*, 2010).

Ao atingir o solo, a água pode seguir diferentes caminhos dependendo das condições da superfície. Através da infiltração e percolação, a água penetra nas camadas do solo e é redistribuída. Esse processo é fundamental para o escoamento subterrâneo, que reabastece os aquíferos e garante o escoamento mesmo em períodos de baixa pluviosidade (Tucci, 2001).

Por outro lado, quando a intensidade da chuva excede a capacidade de retenção de água pelo solo, excede a capacidade de infiltração ou encontra superfícies com baixa permeabilidade (como as rochas e asfalto, por exemplo), ocorre o escoamento superficial direto, que é direcionada pela declividade da superfície. Neste sentido, com alterações no uso e cobertura da terra, rompe-se o equilíbrio

natural. Em específico, com o processo de urbanização, em que há a substituição de superfícies originalmente permeáveis por pavimentos com baixa permeabilidade, ocorre a redução da recarga dos aquíferos e potencializa o escoamento superficial direto, resultando no aumento dos picos de vazão e na velocidade do escoamento superficial direto (Martins *et al.*, 2010).

O clima, diferentemente do tempo meteorológico, refere-se ao estado médio de variáveis atmosféricas essenciais, tais como a temperatura do ar, a precipitação, a umidade, o regime de ventos, a pressão atmosférica e a radiação solar, durante um longo período, geralmente 30 anos ou mais (WMO, 2017).

No entanto, o consenso científico atual, consolidado pelos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), aponta que o aquecimento observado desde meados do Século XX é sem precedentes e impulsionado pela ação humana (IPCC, 2023), o que tende a intensificar a variabilidade climática e os extremos hidrometeorológicos, sobretudo em regiões tropicais e subtropicais. Desta forma, as mudanças climáticas são um dos principais fatores relacionados as alterações das respostas hidrológicas em escala global e regional, com impactos diretos sobre o regime de precipitação, a frequência de eventos extremos e a disponibilidade de água (IPCC, 2023).

O mecanismo central desse aquecimento é a intensificação do efeito estufa. Este fenômeno natural é vital para a manutenção da vida, pois gases presentes na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), retêm parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. O aumento das concentrações desses gases altera o balanço energético do sistema climático, repercutindo na circulação atmosférica e nos processos do ciclo hidrológico (IPCC, 2023)

Paralelamente às mudanças climáticas globais, as alterações no uso e cobertura da terra configuram um importante fator de modulação do ciclo hidrológico local. O desmatamento e a conversão de áreas naturais em usos antrópicos, como agricultura, pastagem e a expansão urbana, alteram o balanço de energia da superfície, modificam a rugosidade, os padrões de evapotranspiração e a infiltração, influenciando direta e indiretamente o regime de precipitação e o escoamento da água nas bacias hidrográficas (Callera *et al.*, 2023). Em grandes regiões tropicais, essas

mudanças podem conduzir ao aumento da temperatura da superfície local e as alterações na circulação atmosférica regional.

Na Região Metropolitana de São Paulo, esse cenário é agravado pela urbanização intensiva, onde a substituição da vegetação natural por edificações e asfalto gera o efeito de ilha de calor urbana, o qual intensifica a formação de tempestades reduzindo a recarga dos aquíferos e diminuindo a vazão durante os períodos de seca (Salemi *et al.*, 2013). A ausência de solo permeável impede a infiltração da água e acelera o escoamento superficial direto, resultando a alteração drástica no regime das bacias. Neste contexto, as infraestruturas de saneamento local podem sofrer sobrecarga, além de aumentar significativamente o risco de inundações e deslizamento em área mais vulneráveis (Marengo *et al.*, 2020).

Essas dinâmicas hidrológicas estão diretamente condicionadas ao clima e às suas variações ao longo do tempo (Marengo, 2006), o que torna fundamental compreender o funcionamento do sistema climático em diferentes escalas temporais. Neste contexto, o ciclo hidrológico deve ser compreendido como um sistema integrado, no qual os processos físicos estão diretamente interligados às condições climáticas e às características da superfície terrestre, sendo sensível ao aquecimento global (IPCC, 2021). Essas alterações, tendem a se manifestar de forma mais evidente por meio da intensificação de eventos extremos de precipitação, como o aumento da temperatura atmosférica, a ampliação da capacidade do ar de reter vapor d'água, o que energiza o sistema climático e potencializa tempestades.

2.2. Eventos extremos de precipitação e Chuvas intensas

Os eventos extremos de precipitação assumem papel central na análise dos impactos das mudanças climáticas. Segundo IPCC (2023), estes extremos geram diversos impactos na sociedade, manifestando-se através de perdas e danos significativos na natureza e nas pessoas. Nas áreas urbanas, as chuvas intensas comprometem a infraestrutura essencial, incluindo os sistemas de transporte, saneamento e energia, resultando em interrupções de serviços e perdas econômicas, afetando de forma desproporcional as comunidades economicamente marginalizadas e vulneráveis (IPCC, 2023).

Nesse sentido, quando há alterações nos padrões de precipitação, se tornando mais incerta no tempo e no espaço, as respostas hidrológicas e a segurança hídrica podem ser afetadas diretamente (IPCC, 2023). Isso ocorre, uma vez que as mudanças climáticas podem afetar não apenas os totais médios de precipitação, mas também a sua distribuição sazonal, a frequência de eventos chuvosos e a intensidade de extremos hidrometeorológicos (Marengo, 2008).

A compreensão dos eventos extremos de precipitação passa, inicialmente, pela dificuldade em estabelecer uma definição única e universal para o termo "evento extremo" (Guimarães, 2025). Este conceito varia conforme o campo de estudo e o enfoque da pesquisa, sendo muitas vezes tratado sob uma ótica matemática e estatística. Nesse sentido, segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2017), os eventos extremos são compreendidos como desvios significativos do estado médio ou típico de um sistema, nos quais os valores observados se distanciam (positiva ou negativamente) das médias climatológicas de uma determinada localidade.

A relevância hidrológica dos eventos extremos está na sua capacidade de atuar como gatilhos imediatos para desastres naturais, uma vez que chuva excepcionais excedem rapidamente a capacidade de infiltração do solo e podem resultar em uma maior vazão de projeto dos sistemas de drenagem. Segundo Silva Júnior *et al.* (2022), existe uma correlação estatística relevante entre a ocorrência de chuvas classificadas como extremas e a decretação de Estado de Calamidade Pública (ECP) pelos municípios.

Dessa forma, o impacto desses eventos é acentuado pela dinâmica de ocupação da terra e pela vulnerabilidade inerente dos centros urbanos. Castelhani (2021) argumenta que a insegurança associada às chuvas intensas está diretamente vinculada à sua concentração temporal, que frequentemente supera a capacidade de infiltração e o esgotamento das redes de drenagem urbana. O estudo enfatiza que, em bacias antropizadas, a ocorrência de inundações e alagamentos é desencadeada por eventos de curta duração e elevada intensidade, os quais atuam como gatilhos para desastres naturais independentemente dos totais anuais acumulados.

Para Almazroui *et al.* (2021), há tendências de aumento na intensidade e na frequência de chuvas intensas em diversas regiões da América do Sul, o que se traduz

em maior recorrência de eventos extremos de vazão, tanto secas quanto cheias, com repercussões sobre a gestão dos recursos hídricos. Observa-se, então, um padrão de "extremos mais extremos": períodos de estiagem mais longos e severos intercalados por chuvas concentradas que os sistemas de drenagem e os solos não conseguem absorver adequadamente (Almazroui *et al.*, 2021).

O Brasil, devido à sua dimensão continental e sua economia fortemente baseada em *commodities* agrícolas e na geração de energia por meio do potencial hidráulico, apresenta alta vulnerabilidade às alterações climáticas (Brasil, 2024). A combinação entre o aumento de temperatura, mudança nos padrões de precipitação e intensificação dos extremos climáticos representam um risco para os recursos hídricos no Brasil (Marengo, 2008). Com a menor previsibilidade da disponibilidade hídrica, o planejamento setorial pode ser comprometido, o que aumenta a vulnerabilidade de regiões já sujeitas a secas e enchentes recorrentes, como o semiárido nordestino e, mais recentemente, as regiões Sudeste e Sul.

Além disso, o estudo de Medeiros (2024) que considera a avaliação de projeções futuras para o território brasileiro, baseada em conjuntos de simulações de modelos climáticos (CMIP5 e CMIP6), constatou uma intensificação na variabilidade temporal das chuvas para o século XXI nos cenários de alta emissão (RCP8.5 e SSP5-8.5). No que tange à região Sudeste, o volume de precipitação apresenta divergências de sinal entre as versões dos modelos, sinalizando redução no modelo CMIP6 e incremento no modelo CMIP5. Neste contexto, o comportamento projetado para o Século XXI indica uma transição para regimes pluviométricos mais erráticos, em que eventos de alta magnitude, antes considerados raros, passam a apresentar tempos de retorno reduzidos, desafiando a resiliência dos sistemas socioambientais frente às novas fronteiras da variabilidade climática (Medeiros, 2024).

A caracterização dos eventos de precipitação é fundamentada na interdependência de três grandezas básicas, sendo elas: intensidade, duração e frequência de ocorrência (Pinto *et al.*, 2010). A intensidade (*i*) representa a taxa de precipitação, definida pela relação entre a lâmina precipitada e o intervalo de tempo, sendo geralmente expressa em milímetros por hora (mm/h). A duração (*t*) corresponde ao período contínuo de ocorrência do evento, variando de minutos a horas. Já a frequência (*f*) é dada como a probabilidade de que um evento de magnitude igual ou

superior a um valor específico ocorra em qualquer ano. Há entre essas variáveis uma relação física inversa, em que: para uma mesma frequência de ocorrência, quanto maior for a duração da chuva, menor será a sua intensidade média. A síntese matemática ou gráfica que correlaciona estas variáveis estocásticas, permitindo a estimativa de chuvas de projeto, é denominada curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) (Tucci, 2001).

O parâmetro de frequência nessas relações é expresso pelo tempo de retorno (TR), ou período de retorno, sendo ele definido estatisticamente como o intervalo de tempo médio, em anos, em que um evento de determinada magnitude é igualado ou superado (Pinto et al., 2010). Este conceito não implica uma periodicidade cíclica exata, mas sim uma média estatística de longo prazo. Inerentemente associada ao tempo de retorno, está a frequência de excedência, ou probabilidade (P), sendo ela a probabilidade de que um evento de magnitude definida ocorra em qualquer ano, sendo calculada pelo inverso do tempo de retorno, como representado na Equação 1 (Pinto et al., 2010).

$$P = \frac{1}{TR} \quad (1)$$

A caracterização dos eventos de precipitação é etapa fundamental para o dimensionamento seguro e econômico de obras de engenharia hidráulica e projetos de conservação de solos. Assim, a escolha do tempo de retorno em um projeto (10, 50 ou 100 anos) reflete diretamente o risco de falha que se está disposto a assumir, baseando-se nas intensidades máximas prováveis modeladas por estudos como os de Denardin e Freitas (1982).

2.3. Mudanças Climáticas e a Agenda 2030: Desafios para a Segurança Hídrica e Resiliência Urbana

Os eventos hidroclimáticos extremos, intensificados em um contexto de aquecimento global, representam desafios centrais para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à segurança hídrica, à resiliência urbana e à ação climática (IPEA, 2024). Criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, a Agenda 2030 constitui um plano de ação global para erradicar a pobreza e promover vida digna a todos. O documento

estabeleceu 17 ODS e 169 metas, que devem ser implementados pelos países signatários, incluindo o Brasil, equilibrando as dimensões econômica, social e ambiental do desenvolvimento sustentável. No contexto brasileiro, a internalização dessas metas é coordenada por órgãos como o IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), que adaptam os indicadores globais à realidade nacional para orientar políticas públicas de infraestrutura, saneamento e saúde, fundamentais para a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas.

Com intensificação da crise climática impondo barreiras críticas ao cumprimento da Agenda 2030 no Brasil, se estabelece uma conexão complexa entre a segurança hídrica (ODS 6 - Água Potável e Saneamento), resiliência e adaptabilidade aos riscos climáticos (ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima) e a resiliência urbana (ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis) (IPEA, 2024). Sob esta ótica, o ODS 13 atua como o eixo transversal que demanda ações urgentes de mitigação e adaptação; enquanto o ODS 6 propõe a eficiência no uso da água e a implementação da gestão integrada dos recursos hídricos frente à crescente incerteza hídrica; já o ODS 11 demanda que os centros urbanos adaptem suas infraestruturas físicas para suportar extremos climáticos, como chuvas ou secas intensificadas.

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a alteração no regime hidrológico, comprovada pela recorrência de secas severas e inundações abruptas, compromete diretamente a disponibilidade hídrica e a capacidade de diluição de efluentes nos corpos d'água, dificultando a universalização do saneamento (ANA, 2024). Esse cenário agrava a vulnerabilidade das cidades, onde a baixa integração entre políticas de recursos hídricos e planejamento urbano resulta em infraestruturas de drenagem insuficientes para suportar os novos padrões de precipitação, ameaçando a meta de tornar os assentamentos humanos inclusivos, seguros e resilientes (IPEA, 2024).

Consequentemente, a falha na adaptação dos sistemas de água e saneamento frente aos extremos climáticos reverbera diretamente na saúde pública (ODS 3 - Saúde e Bem-Estar) (IPEA, 2024). Isso ocorre uma vez que a exposição a desastres hidrometeorológicos, como inundações e deslizamentos, não apenas eleva as taxas de mortalidade imediata, mas também potencializa a disseminação de doenças de

veiculação hídrica e arboviroses em áreas com saneamento precário (IPEA, 2024). Portanto, a adaptação climática transcende a gestão ambiental, se configurando como um determinante social de saúde indispensável para reduzir o número de mortes e doenças causadas por contaminação e poluição, integrando as metas de saúde, saneamento e habitação em uma abordagem sistêmica de prevenção (IPEA, 2024).

A resposta institucional às mudanças climáticas ocorre em dois níveis: mitigação (redução das emissões) e adaptação (ajuste aos efeitos esperados). No cenário internacional, o Acordo de Paris (2016), ratificado pelo Brasil, estabeleceu o objetivo de limitar o aquecimento global a bem menos de 2°C preferencialmente 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais. Para cumprir tal meta, os países signatários apresentam suas Contribuições Nacionalmente Determinadas.

No âmbito nacional, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, fornece a estrutura legal para as ações brasileiras (Brasil, 2009). A PNMC destaca a necessidade de compatibilizar o desenvolvimento econômico-social com a proteção do sistema climático. No entanto, a implementação de medidas efetivas de adaptação, especialmente em infraestrutura urbana e saneamento, ainda enfrenta desafios técnicos e orçamentários.

2.4. Modelos Climáticos Globais e Projeções Climáticas

Os modelos climáticos globais (GCMs) constituem a principal ferramenta para representar a resposta do sistema climático a diferentes situações em escala global. Conforme Chou et al. (2014), estes modelos são imprescindíveis para simular a resposta do sistema climático ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa. Os GCMs operam através de equações diferenciais que representam a dinâmica da atmosfera e dos oceanos, permitindo a simulação do clima passado, presente e futuro.

No entanto, a aplicação direta destes modelos globais em estudos de impacto local e regional apresentam limitações. Chou *et al.* (2014) ressaltam que as incertezas são próprias à modelagem climática e acontecem de três fontes principais: a variabilidade natural interna do sistema climático; a incerteza do modelo (diferenças estruturais na formulação física entre diferentes GCMs); e a incerteza do cenário (o desconhecimento sobre as futuras trajetórias de emissões humanas).

Os cenários futuros adotados no quinto relatório de avaliação do IPCC são denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs), empregadas para descrever diferentes trajetórias de evolução das concentrações de gases de efeito estufa e do forçamento radiativo ao longo do Século XXI (Chou *et al.*, 2014). Segundo o IPCC (2013), o forçamento radiativo é a medida do desequilíbrio no fluxo energético do sistema Terra-Atmosfera, onde valores positivos indicam um acúmulo de energia que resulta em aquecimento.

Nesse contexto, o RCP 4.5 representa um cenário intermediário, como uma trajetória de estabilização, associado a políticas de mitigação e equilíbrio das emissões, onde o forçamento radiativo se estabiliza em $4,5 \text{ W/m}^2$ antes de 2100. Em contrapartida, o RCP 8.5 é considerado um cenário pessimista com emissões muito altas, impulsionado pelo uso intensivo de combustíveis fósseis, com continuidade de altas emissões e concentrações de CO_2 equivalentes superiores a 1000 ppm até 2100, resultando num forçamento radiativo de $8,5 \text{ W/m}^2$. Esses cenários são empregados como condições de contorno em modelos climáticos globais e regionais, permitindo projetar alterações na temperatura, precipitação e índices extremos em diferentes escalas.

Atualmente o sexto relatório de avaliação do IPCC apresenta a análise de futuros possíveis baseada nas Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs), que integram projeções de emissões de GEE com diferentes desenvolvimentos socioeconômicos globais. A nomenclatura destes cenários (SSPx-y) identifica a trajetória socioeconômica subjacente (SSPx) e o nível de forçamento radiativo resultante no ano de 2100 (y, em Watts por metro quadrado) (IPCC, 2023).

Assim, o cenário SSP2-4.5 é classificado como um caminho de emissões de gases de efeito estufa (GEE) intermediárias. Neste cenário, as emissões de dióxido de carbono (CO_2) permanecem em torno dos níveis atuais até meados do século XXI. Assim, a melhor estimativa para o aumento da temperatura da superfície global no período de 2081-2100 é de $2,7^\circ\text{C}$ (variando entre $2,1^\circ\text{C}$ e $3,5^\circ\text{C}$). Já o cenário SSP5-8.5 representa um futuro com emissões de GEE muito altas. As emissões de CO_2 aproximadamente dobram em relação aos níveis atuais por volta de 2050 resultando em um aquecimento severo, com a melhor estimativa de $4,4^\circ\text{C}$ (faixa provável de

3,3°C a 5,7°C) até o final do século. Vale ressaltar que os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 apresentam aproximações aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (Tabela 1).

Tabela 1 – Equivalência entre os cenários de CMIP5 e CIMP6.

Cenário	Equivalência ao RCP	Emissões
SSP1-1.9	Não equivalente.	Muito baixas
SSP1-2.6	RCP2.6 – O cenário RCP mais frio para uma mesma configuração.	Baixas
SSP2-4.5	RCP4.5.	Intermediárias
SSP3-7.0	RCP6 e RCP8 – As emissões de aerossóis foram maiores do que em qualquer outro cenário RCP.	Altas
SSP5-8.5	RCP8.5 – As emissões de CO ₂ pelo SSP são maiores no final do século e as de CH ₄ , menores.	Muito altas

Fonte: Adaptado de IPCC (2023) e Chen (2023).

O modelo HadGEM3-GC31-LL (*Hadley Centre Global Environment Model version 3*), desenvolvido pelo *Met Office Hadley Centre* do Reino Unido, apresenta elevada sensibilidade climática, projetando cenários significativamente mais quentes (Kunda e Akamuga, 2023). Por outro lado, o modelo MIROC6 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6*), desenvolvido por instituições japonesas é um modelo acoplado atmosfera-oceano. Segundo Firpo *et al.* (2022), o MIROC6 demonstra habilidade em representar os padrões de circulação atmosférica em baixos níveis, essenciais para o transporte de umidade na América do Sul. Diferentemente do modelo britânico, o MIROC6 tende a fornecer projeções com padrões distintos de precipitação, indicando, por vezes, superestimativas de chuva no nordeste do Brasil, além de apresentar divergências nas simulações de temperaturas extremas sob cenários de altas emissões (Firpo *et al.*, 2022).

Entre 2014 e 2015, uma seca sem precedentes desde 1960 atingiu a região sudeste, sendo ela causada por um sistema de alta pressão que provocou um bloqueio atmosférico sobre o Sudeste, impedindo a chegada da umidade da Amazônia (Marengo *et al.*, 2015). O esvaziamento dos reservatórios urbanos, comprometeu o abastecimento público de milhões de pessoas e afetou a governança de recursos essenciais. Os impactos socioeconômicos extremos expuseram a alta vulnerabilidade da infraestrutura da região a este tipo de evento (Momm, 2021). Isso não representou

uma crise inteiramente nova, mas sim o intensificou a escassez na bacia do Alto Tietê, agravada pela poluição severa de mananciais próximos e pela degradação de corpos d'água urbanos fundamentais, como a represa Billings (Custódio, 2015).

Esse cenário de estresse hídrico tem sido documentado pela imprensa, o portal Metrôpoles (2024) ilustrou a gravidade da situação ao reportar a formação de extensas faixas de areia na Represa de Guarapiranga, enquanto o G1 (2025) alertou que o sistema paulista chegou a registrar os piores níveis de armazenamento desde a crise histórica de 2013/2014. A complexidade do sistema também foi destacada pela mídia local (Jornal Cotia Agora), que evidenciou volumes mínimos na Represa de Cotia e reforçou a necessidade de contingenciamento.

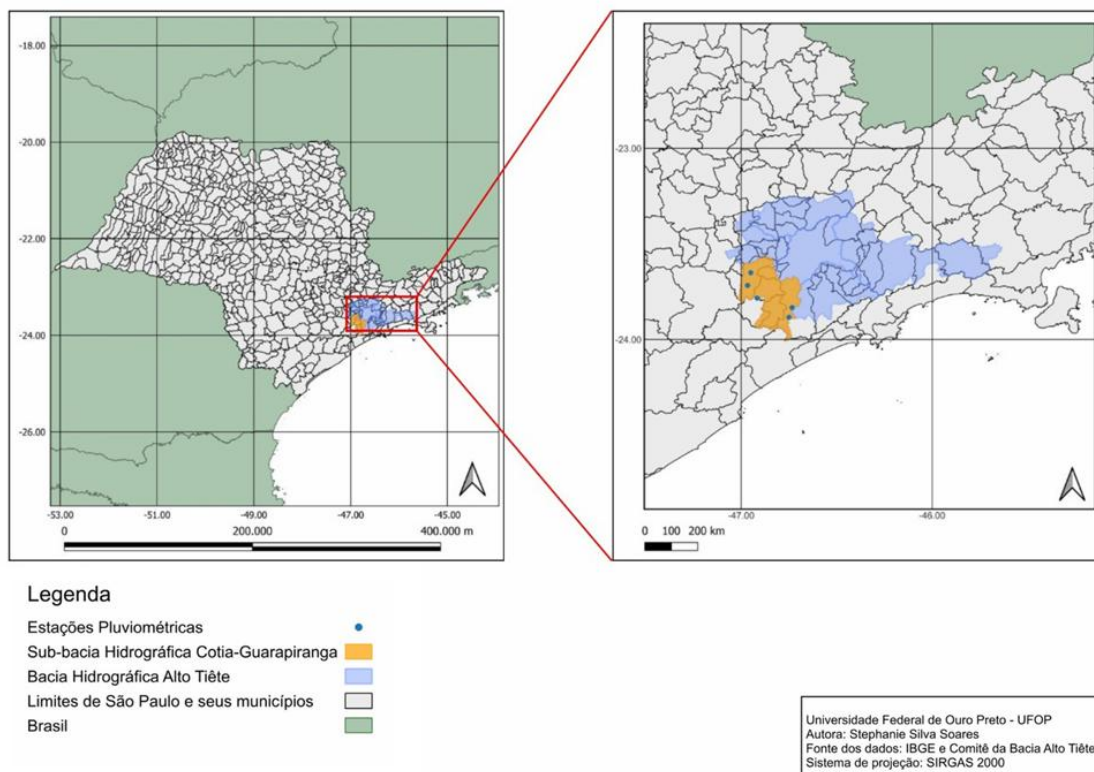
Neste contexto, a análise conjunta de diferentes simulações permite aos pesquisadores identificar a consistência e a dispersão das projeções de precipitação. assim, programas de monitoramento, modelagem climática e hidrológica, além da avaliação de cenários são apontados como instrumentos centrais para identificar riscos e subsidiar estratégias de adaptação.

3. Metodologia

A área de estudo compreendeu a sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga, de grande importância para a segurança hídrica da Região Metropolitana de São Paulo, consolidando-se como um dos maiores mananciais do sistema de abastecimento regional (São Paulo, 2011). Estima-se que o sistema produtor Guarapiranga seja responsável pelo fornecimento de água entre 3,5 e 4 milhões de pessoas, o que representa aproximadamente 20% da população da região (Alvim, 2015; Donnini, 2024).

A sub-bacia situa-se em uma zona de transição microclimática entre os climas subtropical com inverno seco (Cwa) e subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno (Cwb); e o clima temperado úmido de verão ameno (Cfb) (Beck *et al.*, 2023) à medida que se aproxima das escarpas da Serra do Mar. A localização geográfica e a delimitação territorial da sub-bacia podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização da sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga e das estações pluviométricas utilizadas neste estudo.

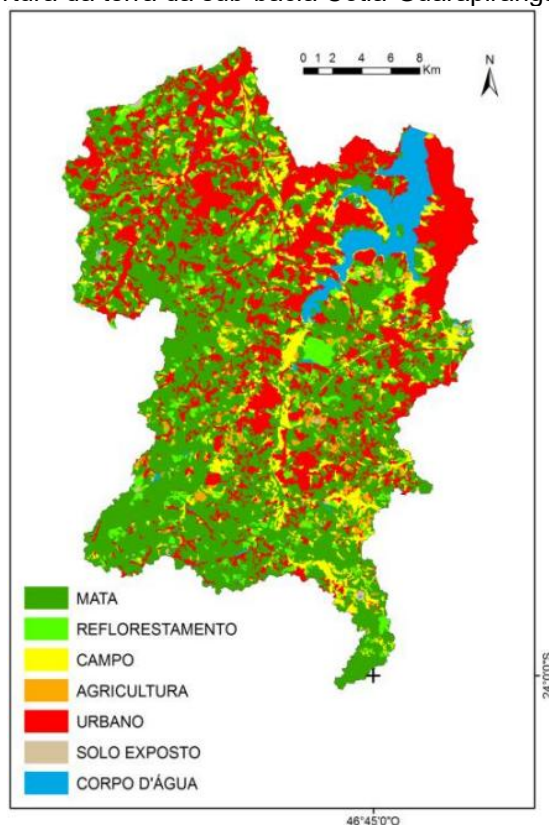


Fonte: Autora (2026).

A sub-bacia tem uma elevação média de aproximadamente 800 metros, seu relevo é caracterizado por variações altimétricas que partem de 730 metros (cota correspondente ao espelho d'água de seus reservatórios) e chegam a ultrapassar 1.000 metros nas regiões de cabeceira e divisores de águas (Whately *et al.*, 2006).

De acordo com Andrade *et al.* (2015), a dinâmica territorial da sub-bacia é caracterizada por uma expressiva heterogeneidade espacial e por um contínuo processo de urbanização que avança sobre o território. O padrão de uso e cobertura da terra divide-se em dois grandes domínios (Figura 2): o primeiro consiste em uma área de forte expansão e adensamento urbano, caracterizada por ocupações residenciais consolidadas e em consolidação, que avança pelas margens e eixos viários da sub-bacia; o segundo representa uma cobertura arbórea onde predomina a Mata Atlântica, partes remanescentes e áreas de reflorestamento, principalmente por eucaliptos, correspondente a 51% da área (Andrade *et al.*, 2015).

Figura 2 - Uso e cobertura da terra da sub-bacia Cotia-Guarapiranga no ano de 2012.



Fonte: Andrade et al. (2015).

Para avaliação da frequência de ocorrência de eventos extremos na região estudada, foram obtidas séries temporais observadas com dados consistidos,

compreendendo o período histórico de 1990 a 2014, do Sistema de Informações de Bacias Hidrográficas (SIBH) da plataforma SP Águas, gerida pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE, 2026).

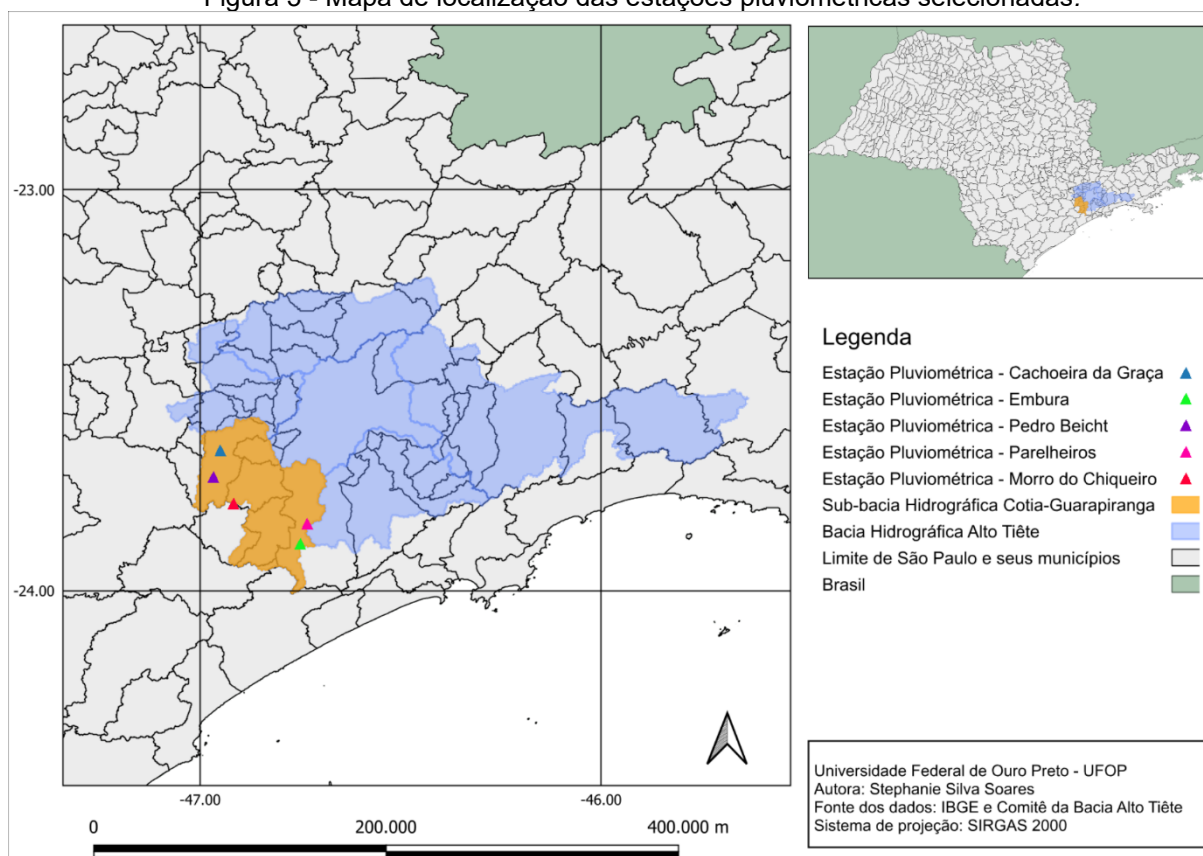
Como critério inicial de seleção das estações pluviométricas, adotou-se o limite máximo de 5% de falhas no registro histórico. Além disso, realizou-se a verificação da distribuição temporal das falhas ao longo dos anos, identificando-se que a maior concentração de dados ausentes ocorreu majoritariamente durante o período de estiagem. A partir dessa análise, foram selecionadas 5 estações pluviométricas localizadas dentro dos limites da sub-bacia (Tabela 2 e Figura 3).

Tabela 2 - Estações pluviométricas selecionadas na Sub-Bacia Cotia-Guarapiranga.

Código DAEE	Nome	Latitude	Longitude	Falha	Séries de dados disponíveis	
E3-027	Pedro Beicht	23° 42' 54"	46° 57' 35"	1,51%	1936	2020
E3-034	Cachoeira da Graça	23° 39' 01"	46° 57' 43"	1,49%	1950	2014
E3-067	Morro do Chiqueiro	23° 47' 00"	46° 56' 00"	4,05%	1958	2018
E3-243	Parelheiros	23° 49' 45"	46° 43' 42"	0,00%	1972	2023
E3-254	Embura	23° 52' 47"	46° 44' 50"	0,34%	1979	2020

Fonte: Autora (2026).

Figura 3 - Mapa de localização das estações pluviométricas selecionadas.



Fonte: Autora (2026).

Quanto às projeções climáticas, estas foram obtidas do conjunto de dados *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher *et al.*, 2022). Esse banco de dados fornece cenários de alta resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (aproximadamente $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$) baseado nos modelos do CMIP6. Além disso, esse conjunto de dados apresenta *downscaling* e correção de viés. Para o presente estudo, foram considerados dois cenários climáticos: SSP2-4.5, que prevê uma estabilização das emissões, e SSP5-8.5, considerado mais pessimista, com elevadas emissões contínuas; e os modelos HADGEM3-GC31-LL e MIROC6. Para a análise do período histórico, foram considerados os dados de 1990 a 2014. Já para as projeções futuras, foram considerados três períodos futuros: 2026 – 2050; 2051 – 2075; e 2076 – 2100.

Para a avaliação da adequação dos modelos climáticos ao clima presente aplicados à sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga, estabeleceu-se uma comparação estatística entre a precipitação observada e modelada para o período

histórico em escala mensal (1990-2014), por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson (r). A correlação permitiu mensurar o grau de dependência linear entre as variáveis e verificar a capacidade dos modelos em reproduzir a variabilidade pluviométrica local, sendo calculado conforme a Equação 2.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Est}_i - \overline{\text{Est}}) * (\text{Obs}_i - \overline{\text{Obs}})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (\text{Est} - \overline{\text{Est}})^2] * [\sum_{i=1}^n (\text{Obs} - \overline{\text{Obs}})^2]}} \quad (2)$$

Onde, “Est” representa os dados estimados pelos modelos climáticos, “Obs” os dados observados nos postos pluviométricos de superfície, “ $\overline{\text{Est}}$ ” e “ $\overline{\text{Obs}}$ ” são as médias dos dados modelados e postos pluviométricos, respectivamente, para o número n da amostra.

O coeficiente de correlação linear de Pearson pode ser classificado como: correlação pequena para coeficientes de 0 a menores que 0,25; fraca para valores de 0,25 a menores que 0,50; moderada para resultados de 0,50 a menores que 0,75; e forte para índices estatísticos de 0,75 a 1,00 (Vieira, 2006).

A análise de eventos extremos foi conduzida por meio do ordenamento decrescente das lâminas de precipitação diária de cada série temporal, tanto para o período histórico (observado e modelado) quanto para os períodos futuros, identificando-se e contabilizando-se as ocorrências com totais diários superiores ou iguais aos limiares de 50 mm e 100 mm. A escolha desses valores fundamenta-se nos critérios operacionais do Centro Virtual para Avisos de Eventos Meteorológicos Severos (ALERT-AS) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024), nos quais acumulados diários entre 50 mm e 100 mm configuram o nível de Perigo (alerta laranja), caracterizado pelo risco iminente de alagamentos e deslizamentos pontuais, enquanto volumes que ultrapassam 100 mm em 24 horas atingem o patamar de Grande Perigo (alerta vermelho), sinalizando alta probabilidade de transbordamentos de rios, inundações estruturais e movimentos de massa em grande escala.

Assim, para o cálculo da frequência de excedência, após o ordenamento dos dados, foi utilizada a fórmula de Weibull, calculada conforme a Equação 3.

$$F_{\text{Obs}} = \frac{m}{N + 1} \quad (3)$$

Em que F_{obs} é a frequência observada, m é a posição do dado ordenado e N é o tamanho da amostra.

Para a extração dos dados dos modelos climáticos e análises estatísticas, utilizou-se o software Python - Versão 3.11 (Python Software Foundation, 2023), com apoio das bibliotecas “NumPy” (Harris et al., 2020), “pandas” (McKinney, 2010), “SciPy” (Virtanen et al., 2020), “Matplotlib” (Hunter, 2007) e “scikit-learn” (Pedregosa et al., 2011). A organização e o tratamento final dos dados foram realizados por meio de planilhas eletrônicas.

O conjunto de séries temporais observadas e as projeções climáticas diárias dos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 utilizadas encontram-se disponibilizados em repositório digital compartilhado (Apêndice A).

4. Resultados e Discussão

O modelo MIROC6 apresentou uma correlação linear moderada entre os dados observados e estimados para a escala mensal para todas as localidades avaliadas; atingindo seus maiores índices nas estações Pedro Beicht (0,634), Cachoeira da Graça (0,627) e Parelheiros (0,609), seguidas por valores ligeiramente menores no Morro do Chiqueiro (0,526) e em Embura (0,502), como observado na Tabela 3. Por outro lado, o modelo HadGEM3-GC31-LL demonstrou um ajuste ligeiramente inferior em termos comparativos; embora também tenha mantido uma correlação moderada na maioria das estações: Pedro Beicht (0,622), Cachoeira da Graça (0,589), Parelheiros (0,587) e Morro do Chiqueiro (0,515); na estação Embura, entretanto, a correlação foi classificada como fraca (0,471).

Neste contexto, o coeficiente de correlação linear de Pearson demonstra uma maior correlação entre a precipitação observada e a modelada pelo MIROC6, em comparação com o modelo HadGEM3-GC31-LL, na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga. A correlação moderada demonstra que os modelos possuem, de maneira geral, a capacidade moderada para representar a variabilidade mensal das chuvas na região.

Tabela 3 - Correlação de Pearson (r) entre os dados de precipitação mensal observada e estimada pelos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 para as estações pluviométricas selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.

Modelos	Estações pluviométricas				
	Pedro Beicht	Cachoeira da Graça	Morro do Chiqueiro	Parelheiros	Embura
MIROC6	0,634	0,627	0,526	0,609	0,502
HADGEM3-GC31-LL	0,622	0,589	0,515	0,587	0,471

Fonte: Autora (2026).

Ao analisar a frequência de ocorrência de chuvas intensas no período histórico (Tabela 4 e Figura 4), observa-se que ambos os modelos simularam uma menor quantidade de eventos com limiares superiores ou iguais a 50 mm e a 100 mm, em comparação com os dados observados. Vale ressaltar ainda que para lâminas de precipitação maiores ou iguais a 50 mm, o MIROC6 modelou um maior número de ocorrências quando comparado ao HADGEM3-GC31-LL. Além disso, ambos os modelos não indicaram a ocorrência de lâminas maiores ou iguais a 100 mm.

A subestimativa dos modelos em relação à frequência de ocorrência de eventos extremos pode estar associada a limitação na representação de processos de mesoescala e feições topográficas locais dos modelos climáticos globais (Almazroui *et al.*, 2021), que resulta na suavização dos picos diários de precipitação e dificulta a simulação de sistemas convectivos de mesoescala e chuvas orográficas locais, que são muito frequentes no relevo acidentado e na Ilha de calor da Região Metropolitana de São Paulo (Castelhani, 2021; Marengo *et al.*, 2020).

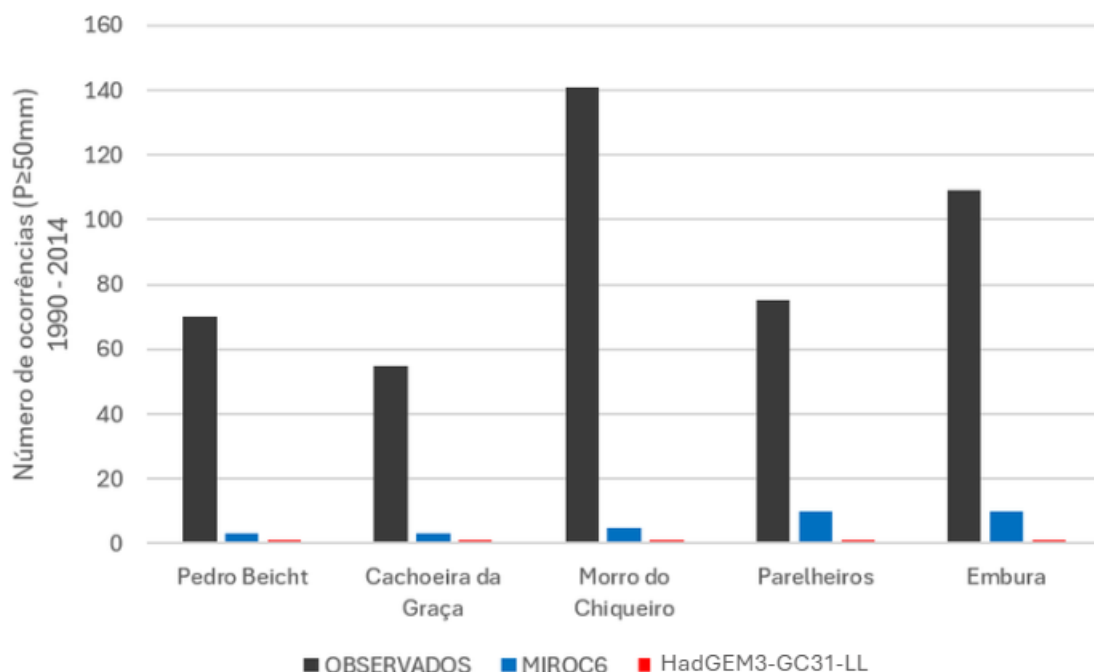
Ao comparar as lâminas máximas diárias do período histórico (Tabela 4), pode-se verificar que os dados observados registraram acumulados diários de até 285,5 mm no Morro do Chiqueiro e 178,5 mm em Embura, enquanto as máximas simuladas pelos modelos para estas mesmas estações não ultrapassaram 76,6 mm (MIROC6) e 85,5 mm (HadGEM3-GC31-LL).

Tabela 4 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações diárias maiores ou iguais que 50 e 100 mm dos dados observados e dos modelos MIROC6 e HadGEM3-GC31-LL para as estações pluviométricas selecionadas, na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga, para o período histórico (1990-2014) e precipitação máxima diária para cada base de dados.

Estação pluviométrica	Modelos	P ≥ 50mm		P ≥ 100mm		Precipitação diária máxima (mm)
		Frequência	Número de ocorrências	Frequência	Número de ocorrências	
Pedro Beicht	Observado	0,00769	70	0,00030	2	121,4
	MIROC6	0,00036	3	0	0	65,9
	HadGEM3-GC31-LL	0,00020	1	0	0	70,8
Cachoeira da Graça	Observado	0,00610	55	0,00027	2	135,7
	MIROC6	0,00036	3	0	0	65,9
	HadGEM3-GC31-LL	0,00020	1	0	0	70,8
Morro do Chiqueiro	Observado	0,01577	141	0,00307	27	285,5
	MIROC6	0,00058	5	0	0	70,8
	HadGEM3-GC31-LL	0,00020	1	0	0	83,5
Parelheiros	Observado	0,00826	75	0,00043	3	164,2
	MIROC6	0,00113	10	0	0	76,6
	HadGEM3-GC31-LL	0,00022	1	0	0	85,5
Embura	Observado	0,01186	109	0,00070	6	178,5
	MIROC6	0,00113	10	0	0	76,6
	HadGEM3-GC31-LL	0,00022	1	0	0	85,5

Fonte: Autora (2026).

Figura 4 - Comparação entre dados observados e simulados (MIROC6 e HadGEM3-GC31-LL) para precipitações diárias maiores ou iguais a 50 mm, por estação pluviométrica, para os anos de 1990 a 2014, na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga.



Fonte: Autora (2026).

Para o período de 2026 a 2050, projeta-se um aumento no número de ocorrências de precipitação diária maiores ou iguais que 50 mm para a região de estudo, quando comparado ao período histórico modelado (Tabela 5). Tal questão corrobora com estudos desenvolvidos na América do Sul, considerando os modelos climáticos do CMIP6, os quais observaram que o aumento da sazonalidade se baseia no aquecimento atmosférico promovido pelas crescentes emissões de gases de efeito estufa, o qual amplia a capacidade de retenção de vapor d'água no ar e energiza o ciclo hidrológico (Almazroui *et al.*, 2021).

Sob o cenário intermediário (SSP2-4.5), constata-se um aumento no número de ocorrências de eventos com precipitação maiores ou iguais que 50 mm para a maioria das estações quando comparados ao período histórico simulado (Tabela 5). Para o modelo MIROC6, destacam-se os aumentos observados na estação Morro do Chiqueiro, que teve um acréscimo de 5 para 8 ocorrências, e nas estações Parelheiros e Embura, que passaram de 10 para 13 eventos cada. Para o modelo HadGEM3-GC31-LL, o crescimento foi apresentado nos postos da porção centro-sul e leste: o

Morro do Chiqueiro triplicou seus registros (passando de 1 para 3 ocorrências), e as estações Parelheiros e Embura subiram de 1 para 6 ocorrências cada, mantendo 1 evento em Pedro Beicht e em Cachoeira da Graça.

Sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), o modelo MIROC6 indicou um aumento generalizado no número de ocorrências de chuvas maiores ou iguais que 50 mm para todas as estações pluviométricas da sub-bacia (Tabela 5). Nesse modelo, as estações Pedro Beicht e Cachoeira da Graça registraram 7 eventos cada (mais que o dobro do período histórico simulado), o Morro do Chiqueiro alcançou 12 ocorrências e as estações Parelheiros e Embura atingiram 16 eventos cada. Em contrapartida, o modelo HadGEM3-GC31-LL apresentou uma dinâmica de retração no número de eventos extremos para esse mesmo horizonte, ou seja, não projetou nenhuma ocorrência para as estações Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, registrou apenas 1 ocorrência no Morro do Chiqueiro e contabilizou 5 episódios em Parelheiros e em Embura.

Ao comparar os cenários, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, foi projetado comportamentos distintos entre os modelos (Tabela 5). Enquanto o modelo MIROC6 intensificou as ocorrências em toda a sub-bacia ao migrar para o cenário mais severo (SSP5-8.5), elevando os registros de 2 para 7 eventos em Pedro Beicht, de 1 para 7 em Cachoeira da Graça, de 8 para 12 no Morro do Chiqueiro e de 13 para 16 em Parelheiros e Embura, o que representou um acréscimo médio de cerca de 57% no total de episódios, o modelo HadGEM3-GC31-LL exibiu uma dinâmica inversa, o qual modelou uma redução no número de eventos em todas as estações monitoradas, com diminuições de 1 para 0 ocorrência em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, de 3 para 1 no Morro do Chiqueiro e de 6 para 5 em Parelheiros e Embura, configurando uma redução de 65% do número de ocorrências de precipitação maiores ou iguais a 50 mm (Tabela 5).

Tabela 5 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações diárias maiores ou iguais que 50 e 100 mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos MIROC6 e HadGEM3-GC31-LL no período de 2026 a 2050 para as estações selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga e a precipitação diária máxima simulada.

Cenário	Estação pluviométrica	Modelo	P≥50mm		P≥100mm		Precipitação diária máxima simulada (mm)
			Frequência	Número de ocorrências	Frequência	Número de ocorrências	
SSP2-4.5	Pedro Beicht	MIROC6	0,00019	2	0	0	61,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00016	1	0	0	55,0
	Cachoeira da Graça	MIROC6	0,00030	1	0	0	61,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00016	1	0	0	55,0
	Morro do Chiqueiro	MIROC6	0,00097	8	0	0	73,1
		HADGEM3-GC31-LL	0,00036	3	0	0	54,0
	Parelheiros	MIROC6	0,00147	13	0	0	70,5
		HADGEM3-GC31-LL	0,00077	6	0	0	55,0
	Embura	MIROC6	0,00147	13	0	0	70,5
		HADGEM3-GC31-LL	0,00077	6	0	0	55,0
SSP5-8.5	Pedro Beicht	MIROC6	0,00080	7	0	0	71,4
		HADGEM3-GC31-LL	0,00000	0	0	0	42,9
	Cachoeira da Graça	MIROC6	0,00080	7	0	0	71,4
		HADGEM3-GC31-LL	0,00000	0	0	0	42,9
	Morro do Chiqueiro	MIROC6	0,00138	12	0	0	83,2
		HADGEM3-GC31-LL	0,00021	1	0	0	59,7
	Parelheiros	MIROC6	0,00182	16	0	0	84,6
		HADGEM3-GC31-LL	0,00060	5	0	0	66,6
	Embura	MIROC6	0,00182	16	0	0	84,6
		HADGEM3-GC31-LL	0,00060	5	0	0	66,6

Fonte: Autora (2026).

No período de 2051 a 2075 (Tabela 6), foi projetado uma convergência de resultados entre os dois cenários de emissões: nas estações Parelheiros e Embura, o modelo HadGEM3-GC31-LL projetou exatamente o mesmo número de eventos para lâminas maiores ou iguais que 50 mm (11 ocorrências). Já o MIROC6, foram projetados 16 e 17 ocorrências (≥ 50 mm) para o SSP2-4.5 e SSP5-8.5, em ordem. É importante destacar que as estações Pedro Beicht e Cachoeira da Graça se encontram na mesma grade dos modelos climáticos. Isso também foi observado para as estações Parelheiros e Embura.

Para o cenário SSP2-4.5, ambos os modelos climáticos apontaram para um aumento no número de ocorrências de chuvas maiores ou iguais a 50 mm em todas as estações pluviométricas avaliadas quando comparadas ao período anterior (2026–2050). No modelo MIROC6, as modelagens subiram de 2 para 7 eventos em Pedro Beicht, de 1 para 7 em Cachoeira da Graça, de 8 para 9 no Morro do Chiqueiro e de 13 para 16 ocorrências tanto em Parelheiros quanto em Embura. No modelo HadGEM3-GC31-LL, esse avanço temporal foi ainda mais nítido, modelando elevações de 1 para 5 eventos em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, de 3 para 8 eventos no Morro do Chiqueiro e de 6 para 11 ocorrências em Parelheiros e Embura (Tabela 6).

O comportamento entre os modelos divergiu em relação ao período anterior no cenário pessimista (SSP5-8.5). O modelo MIROC6 indicou relativa constância no número de eventos nas estações Pedro Beicht e Cachoeira da Graça mantiveram as mesmas 7 ocorrências, enquanto o Morro do Chiqueiro passou de 12 para 11 eventos, e Parelheiros e Embura apresentaram um acréscimo de 16 para 17 ocorrências cada. Já o modelo HadGEM3-GC31-LL apresentou crescimento em relação ao período 2026–2050: os eventos aumentaram de 0 para 4 ocorrências em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, de 1 para 7 no Morro do Chiqueiro e de 5 para 11 ocorrências em Parelheiros e Embura.

Sob o cenário intermediário (SSP2-4.5), o modelo HadGEM3-GC31-LL projetou aumento nos picos de precipitação máxima diária em relação ao período anterior (2026–2050), alcançando 86,0 mm nas estações Parelheiros e Embura, 84,5 mm no Morro do Chiqueiro e 74,0 mm em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça. Para esse mesmo cenário, o modelo MIROC6 simulou lâminas máximas de 84,0 mm, 77,0 mm

e 69,5 mm nas respectivas localidades. Sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), os valores máximos mantiveram muito próximas às do cenário intermediário, atingindo 87,5 mm no HadGEM3-GC31-LL e 84,2 mm no MIROC6 nas estações Parelheiros e Embura, seguidos por 83,3 mm e 78,5 mm no Morro do Chiqueiro, e 73,5 mm e 72,6 mm em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça. .

Tabela 6 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações diárias maiores ou iguais que 50 e 100 mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 no período de 2051 a 2075 para as estações selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga e a precipitação diária máxima simulada.

Cenário	Estação pluviométrica	Modelo	P≥50mm		P≥100mm		Precipitação diária máxima simulada (mm)
			Frequência	Número de ocorrências	Frequência	Número de ocorrências	
SSP2-4.5	Pedro Beicht	MIROC6	0,00084	7	0	0	69,5
		HADGEM3-GC31-LL	0,00061	5	0	0	74,0
	Cachoeira da Graça	MIROC6	0,00084	7	0	0	69,5
		HADGEM3-GC31-LL	0,00061	5	0	0	74,0
	Morro do Chiqueiro	MIROC6	0,00109	9	0	0	77,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00093	8	0	0	84,5
	Parelheiros	MIROC6	0,00183	16	0	0	84,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00130	11	0	0	86,0
	Embura	MIROC6	0,00183	16	0	0	84,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00130	11	0	0	86,0
SSP5-8.5	Pedro Beicht	MIROC6	0,00079	7	0	0	72,6
		HADGEM3-GC31-LL	0,00055	4	0	0	73,5
	Cachoeira da Graça	MIROC6	0,00079	7	0	0	72,6
		HADGEM3-GC31-LL	0,00055	4	0	0	73,5
	Morro do Chiqueiro	MIROC6	0,00121	11	0	0	78,5
		HADGEM3-GC31-LL	0,00084	7	0	0	83,3
	Parelheiros	MIROC6	0,00189	17	0	0	84,2
		HADGEM3-GC31-LL	0,00124	11	0	0	87,5
	Embura	MIROC6	0,00189	17	0	0	84,2
		HADGEM3-GC31-LL	0,00124	11	0	0	87,5

Fonte: Autora (2026)

No final do Século XXI (2076 a 2100), o cenário SSP2-4.5 projetou redução no número de ocorrências de chuvas maiores ou iguais a 50 mm para o modelo HadGEM3-GC31-LL em todas as estações (reduzindo de 5 para 2 em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, de 8 para 4 no Morro do Chiqueiro, e de 11 para 5 em Parelheiros e Embura), como pode ser observado Tabela 7. Em contrapartida, o modelo MIROC6 projetou, em média, aumento no número de eventos, com destaque para as estações Parelheiros e Embura, em que foram projetados aumentos de 16 para 22 ocorrências (quase dobrando em relação aos 13 eventos projetados em 2026–2050), além do avanço de 9 para 13 eventos no Morro do Chiqueiro (Tabela 7).

Já para o cenário SSP5-8.5, o modelo MIROC6 projetou 44 ocorrências com precipitações diárias superiores a 50 mm nas estações de Parelheiros e Embura, 30 eventos na estação Morro do Chiqueiro e 17 ocorrências em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça. No modelo HadGEM3-GC31-LL também foram projetados aumentos gerais dos eventos sob altas emissões (SSP5-8.5), simulando até 15 episódios de precipitação maiores ou iguais do que 50 mm em Parelheiros e Embura, 10 no Morro do Chiqueiro e 6 em Pedro Beicht e Cachoeira da Graça (Tabela 7).

Comparando os dois cenários climáticos para o final do século (Tabela 7), ambos os modelos projetaram um aumento médio de aproximadamente 2,6 vezes no número de ocorrências para todas as estações no SSP5-8.5 quando comparado ao SSP2-4.5

Ainda para esse período (Tabela 7), sob o cenário SSP5-8.5, constata-se uma disparidade espacial no modelo MIROC6, no qual as estações Parelheiros e Embura (localizadas no setor leste/sudeste da sub-bacia) concentram uma quantidade superior de episódios extremos em comparação às estações Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, situadas na porção oeste. Essa distribuição espacial demonstra que a porção leste e sudeste da sub-bacia, geograficamente mais próxima da barreira orográfica da Serra do Mar e da entrada de umidade marítima, poderá ter uma maior frequência e concentração de episódios de chuvas intensas do que o setor oeste (Marengo, 2020).

Tabela 7 - Frequência de excedência e número de ocorrência das precipitações diárias maiores ou iguais que 50 e 100 mm para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 no período de 2076 a 2100 para as estações selecionadas na sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga e a precipitação diária máxima simulada.

Cenário	Estação pluviométrica	Modelo	P ≥ 50mm		P ≥ 100mm		Precipitação diária máxima simulada (mm)
			Frequência	Número de ocorrências	Frequência	Número de ocorrências	
SSP2-4.5	Pedro Beicht	MIROC6	0,00055	4	0	0	72,4
		HADGEM3-GC31-LL	0,00025	2	0	0	52,8
	Cachoeira da Graça	MIROC6	0,00055	4	0	0	72,4
		HADGEM3-GC31-LL	0,00025	2	0	0	52,8
	Morro do Chiqueiro	MIROC6	0,00147	13	0	0	83,9
		HADGEM3-GC31-LL	0,00047	4	0	0	62,6
	Parelheiros	MIROC6	0,00242	22	0	0	85,9
		HADGEM3-GC31-LL	0,00062	5	0	0	69,8
	Embura	MIROC6	0,00242	22	0	0	85,9
		HADGEM3-GC31-LL	0,00062	5	0	0	69,8
SSP5-8.5	Pedro Beicht	MIROC6	0,00197	17	0	0	77,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00067	6	0	0	68,6
	Cachoeira da Graça	MIROC6	0,00197	17	0	0	77,0
		HADGEM3-GC31-LL	0,00067	6	0	0	68,6
	Morro do Chiqueiro	MIROC6	0,00332	30	0	0	87,6
		HADGEM3-GC31-LL	0,00113	10	0	0	79,0
	Parelheiros	MIROC6	0,00483	44	0	0	90,2
		HADGEM3-GC31-LL	0,00171	15	0	0	85,7
	Embura	MIROC6	0,00483	44	0	0	90,2
		HADGEM3-GC31-LL	0,00171	15	0	0	85,7

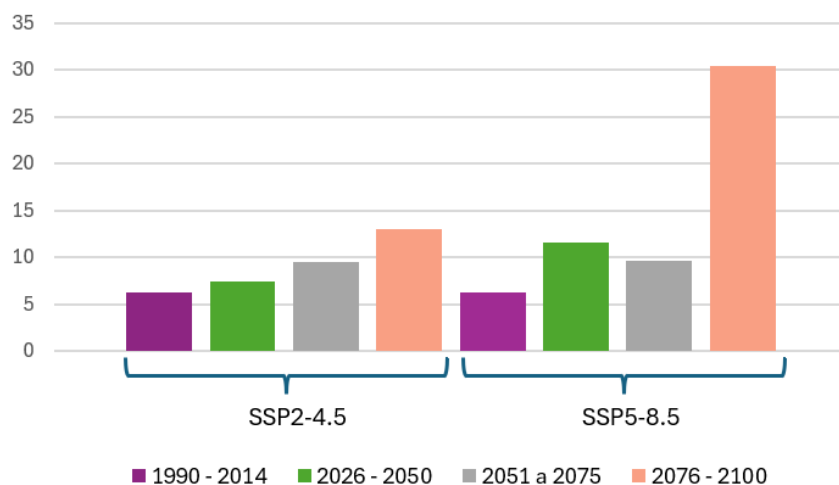
Fonte: Autora (2026).

A avaliação do número de ocorrência de precipitações modeladas maiores ou iguais a 50 mm para todo o período de tempo avaliado (Figuras 5 e 6), evidencia que o modelo MIROC6 indicou os maiores quantitativos médios de ocorrências para todas as estações, períodos e cenários em relação ao HadGEM3-GC31-LL. Sob o cenário intermediário (SSP2-4.5), o MIROC6 projetou um crescimento contínuo e progressivo das médias ao longo de todo o horizonte temporal analisado, enquanto o HadGEM3-GC31-LL projetou um aumento gradual nas médias até meados do século (2051–2075), seguido por uma diminuição no final do período (2076–2100).

Em contrapartida, sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), o comportamento dos modelos divergiu em sua dinâmica temporal, com o MIROC6 exibindo alternância entre crescimentos e retrações nos períodos intermediários antes de projetar uma expressiva expansão no final do século, ao passo que o HadGEM3-GC31-LL projetou um aumento constante no número médio de ocorrências ao longo de todos os quatro períodos avaliados.

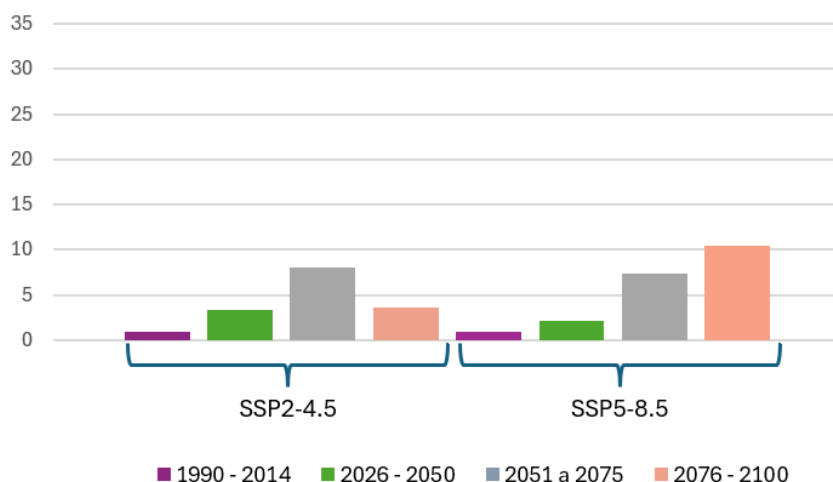
Embora as ocorrências de precipitação diárias maiores ou iguais a 100 mm permaneçam nulas nas projeções futuras, em razão da suavização de grade dos modelos climáticos globais, projeta-se uma elevação contínua das precipitações máximas diárias simuladas. No encerramento do século (2076–2100) sob o cenário SSP5-8.5, as lâminas máximas atingiram 90,2 mm no MIROC6 e 85,7 mm no HadGEM3-GC31-LL nas estações Parelheiros e Embura, aproximando-se do limiar crítico de Grande Perigo do INMET e reforçando a intensificação dos episódios de tempestades no setor leste/sudeste da sub-bacia.

Figura 5 - Média dos números de ocorrências para lâminas de precipitação maiores ou iguais que 50 mm para o modelo MIROC6.



Fonte: Autora (2026).

Figura 6 - Média dos números de ocorrências para lâminas de precipitação maiores ou iguais que 50 mm para o modelo HADGEM3-GC31-LL.



Fonte: Autora (2026).

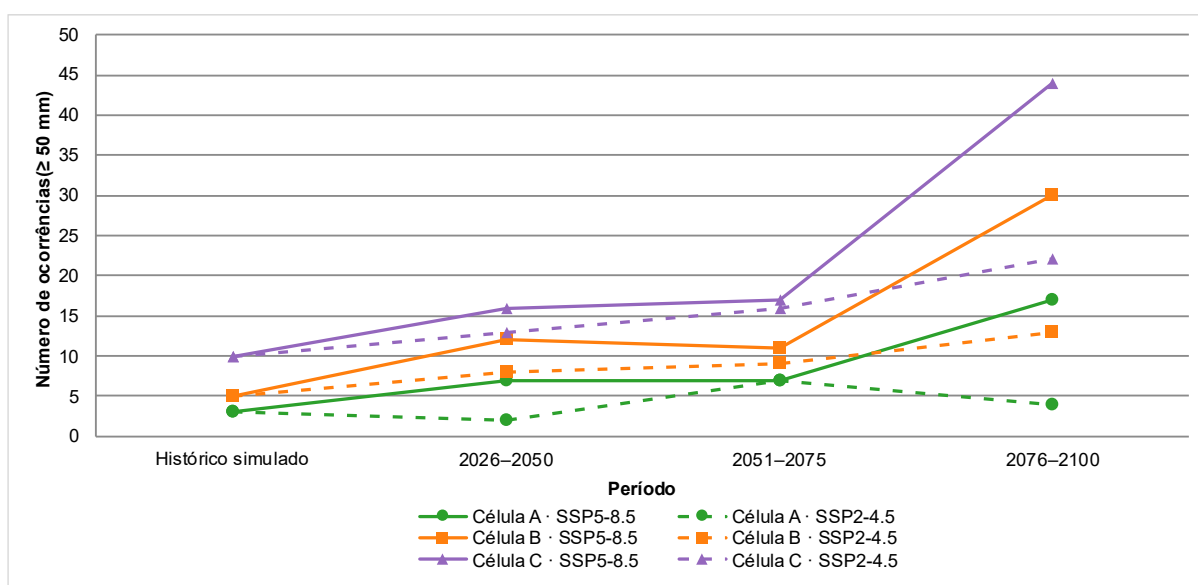
Em relação à divisão espacial das estações pluviométricas em células climáticas de grade da modelagem global, obteve-se as células A, B e C. A célula A, no setor oeste da bacia, correspondente às estações de Pedro Beicht e Cachoeira da Graça; a célula B, localizada no setor central, compreendendo a estação Morro do Chiqueiro; e célula C, no setor leste/sudeste, abrangendo as estações pluviométricas Parelheiros e Embura (Figuras 7 e 8).

No modelo MIROC6, sob o cenário pessimista (SSP5-8.5) para o período de 2076-2100, a Célula C projeta 44 ocorrências, enquanto as Células B e A apresentam trajetórias mais moderadas, registrando 30 e 17 eventos, respectivamente. Já sob o cenário intermediário (SSP2-4.5) para o mesmo período, a Célula C continua com o maior número de ocorrências chegando ao total de 22, 13 na Célula B e 4 na Célula A (Figura 7).

O modelo HadGEM3-GC31-LL reproduz o mesmo padrão de distribuição espacial no período de 2076-2100, embora com quantitativos inferiores: sob o cenário SSP5-8.5, a Célula C contabiliza 15 ocorrências, 10 projeções para Célula B e 6 na Célula A, e no cenário SSP2-4.5 são projetados 5 eventos na Célula C, em comparação a 4 na Célula B e 2 na Célula A (Figura 8).

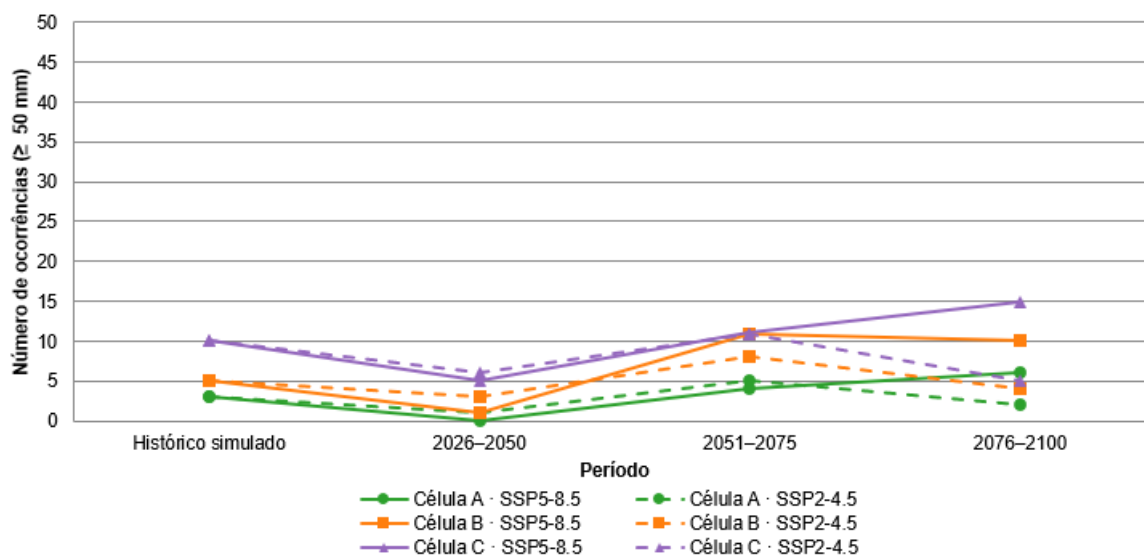
As diferenças encontradas entre o número de ocorrência de chuvas extremas modeladas para as três células no interior da sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga podem estar relacionadas com a heterogeneidade espaço-temporal da precipitação. Esta ocorre devido ao efeito orográfico induzido pelo alinhamento do compartimento leste/sudeste com as escarpas da Serra do Mar, cuja barreira topográfica intensifica a ascensão de umidade marítima do Oceano Atlântico e favorece episódios convectivos severos em maior escala do que no setor continental oeste da sub-bacia (Marengo et al., 2020).

Figura 7 – Número de eventos de precipitação maiores ou iguais que 50 mm, separados por célula climática do modelo MIROC6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.



Fonte: Autora (2026).

Figura 8 – Número de eventos de precipitação maiores ou iguais que 50 mm, separados por célula climática do modelo HadGEM3-GC31-LL para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.



Fonte: Autora (2026).

As análises feitas neste estudo podem auxiliar tanto a gestão dos recursos hídricos quanto o planejamento urbano da Região Metropolitana de São Paulo, especialmente pela sub-bacia ser importante para o sistema de abastecimento. Embora os modelos climáticos globais apresentem uma subestimativa histórica dos picos diários de precipitação no clima presente em relação aos dados observados, ambos os modelos convergem para um aumento na frequência de chuvas maiores ou iguais a 50 mm ao longo do século XXI. Ou seja, projeta-se uma elevação média no número de eventos de 2,3 vezes sob o cenário intermediário (SSP2-4.5), e de 5,7 vezes sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5). Assim, no final do século XXI (2076–2100), o cenário de altas emissões apresenta um número de eventos 2,6 vezes superior ao projetado para o cenário intermediário.

Assim, quando precipitações concentradas incidem sobre áreas antropizadas e impermeabilizadas, a lâmina precipitada é convertida em escoamento superficial direto (Andrade et al., 2015; Tucci, 2001). Essa dinâmica pode superar a vazão de projeto das redes de macrodrenagem convencionais, resultando em inundações, enxurradas, deslizamentos de encostas e o carreamento de sedimentos e poluentes para dentro dos corpos hídricos (Castelhani, 2021; Fritzen et al., 2011; Silva Júnior et al., 2022). Além das perdas socioeconômicas, esses eventos afetam principalmente as populações em áreas de vulnerabilidade social, potencializando a transmissão de

enfermidades de veiculação hídrica e impondo barreiras diretas ao cumprimento do ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) e do ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) (IPEA, 2024; ONU, 2015).

Diante do possível aumento no número de ocorrências extremas projetado para o cenário SSP5-8.5 no final do século XXI, torna-se indispensável que o planejamento municipal e a gestão de recursos hídricos adotem diretrizes contínuas e proativas de adaptação climática (ODS 13). Essa abordagem demanda tanto a revisão dos parâmetros de dimensionamento hidráulico e curvas IDF locais quanto a implantação progressiva de Soluções Baseadas na Natureza e infraestruturas verdes e azuis, como bacias de retenção, pavimentos permeáveis, jardins de chuva e recuperação de matas ciliares (Herzog, 2021; Vissirini et al., 2023). Tais instrumentos desempenham papel central no amortecimento das vazões de pico, no incremento da recarga de aquíferos e no aumento da resiliência das cidades frente aos extremos projetados para as próximas décadas.

5. Conclusão

Para o período histórico avaliado (1990–2014), para a sub-bacia hidrográfica Cotia-Guarapiranga, foi observada uma correlação linear de Pearson classificada, no geral, como moderada, entre os modelos climáticos globais MIROC6 e HadGEM3-GC31-LL e os dados observados em escala mensal. O MIROC6 exibiu coeficientes ligeiramente superiores aos do HadGEM3-GC31-LL, contudo ambos subestimaram a frequência de ocorrência de chuvas maiores ou iguais a 50 mm e não capturam precipitações superiores ou iguais a 100 mm.

Para as projeções, constatou-se um aumento inicial no número de ocorrência de chuvas diárias maiores ou iguais a 50 mm no primeiro horizonte (2026–2050) em comparação ao período histórico simulado, seguido por uma fase de estabilização e convergência entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em meados do século (2051–2075).). No final do século (2076–2100), as projeções evidenciam que sob o cenário intermediário (SSP2-4.5), o HadGEM3-GC31-LL projeta redução nas ocorrências enquanto o MIROC6 mantém o aumento; sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), contudo, ambos os modelos convergem ao projetar uma intensificação.

Embora o HadGEM3-GC31-LL tenha projetado uma taxa de crescimento proporcional mais expressiva ao triplicar suas ocorrências no cenário pessimista, o

modelo MIROC6 projetou consistentemente os maiores quantitativos absolutos em todos os cenários e períodos, dobrando suas ocorrências a partir de um patamar já elevado (avançando de 22 para 44 eventos nas estações Parelheiros e Embura) e alcançando precipitações máximas de 90,2 mm.

Dessa forma, torna-se necessário a integração de medidas de adaptação climática nas diretrizes de planejamento urbano e gestão dos recursos hídricos, em consonância com as metas do ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) estabelecidas pela Agenda 2030. A intensificação dos eventos extremos impõe a revisão das curvas Intensidade-Duração-Frequência e a atualização dos parâmetros de dimensionamento hidráulico das redes de macrodrenagem urbana, visando mitigar os riscos de inundações e enxurradas, e consequentemente reduzindo a vulnerabilidade sanitária da população, conforme preconizado pelos ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 3 (Saúde e Bem-Estar).

Vale mencionar ainda que a incorporação de Soluções Baseadas na Natureza e de infraestruturas verdes e azuis, apresenta-se como estratégia estrutural para ampliar a capacidade de infiltração, retardar picos de escoamento superficial direto e promover a resiliência socioambiental metropolitana frente aos desafios climáticos futuros.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem focar na ampliação no número de estações pluviométricas analisadas, incluindo postos localizados no entorno e em diferentes setores da sub-bacia Cotia-Guarapiranga, de modo a melhorar a representatividade espacial dos dados e permitir uma avaliação mais abrangente da ocorrência e distribuição das chuvas intensas na região.

Além disso, pode-se empregar um maior número de modelos climáticos globais, permitindo comparar se as tendências encontradas com HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 se mantêm em outros modelos do CMIP6. O aprimoramento dessas análises poderá subsidiar estudos voltados ao dimensionamento e à revisão de sistemas de drenagem urbana, bem como ao planejamento territorial da sub-bacia. Estas medidas podem auxiliar na identificação de áreas mais suscetíveis a

alagamentos e inundações e na definição de estratégias de ocupação do solo mais compatíveis com cenários futuros de aumento da ocorrência de chuvas intensas.

Referências

ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 155-183, jun. 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00233-6.

ALVIM, A. M. M. et al. Governança da água e a crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo. **Revista de Gestão de Água da Bacia do Prata**, v. 2, n. 1, p. 15-28, 2015.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2024**: Informe Anual. Brasília: ANA, 2024.

ANDRADE, M. R. M. de et al. Mapeamento de uso da terra para avaliação da qualidade das águas do Reservatório Guarapiranga. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 258-274, 2015.

ARMANI, G. et al. Projeções climáticas regionalizadas para o Estado de São Paulo, Brasil, no período 2020 - 2050. **Derbyana**, São Paulo, v. 43, e773, p. 1-17, 2022. DOI: 10.14295/derb.v43.773.

BECK, H. E. et al. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. **Scientific Data**, v. 10, art. 724, 2023.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 1, 6 jun. 2017.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF, p. 109, 30 dez. 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). **Plano Clima**: Estratégia Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Brasília, DF: MMA, 2024.

CALLERA, Z. et al. Escoamento superficial e riscos ambientais: uma análise hidrológica da Bacia do Ribeirão Itaim em Taubaté-SP. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, Taubaté, v. 1, n. 7, 2023.

CASTELHANI, F. J. **Inundações urbanas e a resiliência das cidades**: desafios para o planejamento urbano. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

CEMADEN – CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **Relatório Anual de Atividades 2017**. São José dos Campos: CEMADEN, 2017.

CHEN, D. et al. Framing, Context, and Methods. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. p. 147–286.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512–527, 2014.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of deforestation on the hydrologic cycle in Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1521, p. 1765-1775, 2009.

COM últimas chuvas, nível da represa de Cotia ultrapassa os 50%. **Jornal Cotia Agora**, Cotia, [20--]. Disponível em: <https://www.jornalcotiaagora.com.br>.

CUSTÓDIO, V. Os mananciais da Região Metropolitana de São Paulo: dilemas da gestão urbana e ambiental. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 123-144, 2015.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Bacias Hidrográficas (SIBH)**. Plataforma SP Águas, 2026. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br>.

DENARDIN, J. E.; FREITAS, P. L. de. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 10, p. 1409-1416, 1982.

DONNINI, R. **A crise hídrica e a resiliência dos mananciais paulistas**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2024.

FIRPO, M. A. F. et al. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, art. 948499, p. 1-27, 2022. DOI: 10.3389/fclim.2022.948499.

FRITZEN, M. A. et al. O impacto da urbanização no ciclo hidrológico: estudo de caso na bacia do Rio Belém, Curitiba/PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 15-26, 2011.

G1. Com chuvas abaixo da média no Sudeste, reservatórios de São Paulo atingem menor nível registrado em dezembro desde a crise hídrica. **Seção Meio Ambiente**, 31 dez. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2025/12/31/com-chuvas-abaixo-da-media-no-sudeste-reservatorios-de-sao-paulo-atingem-menor-nivel-registrado-em-dezembro-desde-a-crise-hidrica.ghtml>.

GUIMARÃES, N. S. B. **Análise espaço temporal de eventos extremos de precipitação no estado de São Paulo**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

HERZOG, C. P. Capítulo 8: Alternativas baseadas na natureza para cidades resilientes. In: **Alternativas tecnológicas e políticas públicas na prevenção e controle de enchentes no Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Fundação CEPERJ / COPRUA, [2021]. p. 1-66.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). ALERT-AS: Centro Virtual para Avisos de Eventos Meteorológicos Severos. Brasília, DF: INMET, 2024. Disponível em: <https://avisos.inmet.gov.br/>

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis)**. Cadernos ODS. Brasília: Ipea, 2024.

KUNDA, J. J.; AKAMUGA, A. V. Evaluation of Five Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) Models from Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for

Simulating Effects of Extreme Temperature on Human Health in Abuja, Nigeria. **Nigerian Journal of Tropical Geography**, v. 9, n. 1, p. 180-201, 2023.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MARENGO, J. A. Água e Mudanças Climáticas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 31-44, 2015.

MARENGO, J. A. et al. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts. **Frontiers in Climate**, v. 2, art. 3, p. 1-15, 2020. DOI: 10.3389/fclim.2020.00003.

MARTINS, J. A. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

MARTINS, L. L.; SOBIERAJSKI, G. da R.; BLAIN, G. C. Elevações na frequência de ocorrência de secas meteorológicas no estado de São Paulo sob condições de mudanças climáticas. **Derbyana**, São Paulo, v. 44, e789, 2023. DOI: 10.14295/derb.v44.789.

MCKINNEY, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. In: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 9., 2010, Austin. **Proceedings** [...]. Austin: SciPy, 2010. p. 56-61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1845-00a.

MEDEIROS, F. J. **Projeções de extremos climáticos de precipitação no Brasil para o século XXI utilizando modelos do CMIP6**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

MOMM, S. et al. A vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água urbanos em cenários de mudanças climáticas. **Revista Ambiente & Sociedade**, v. 24, e0112, 2021.

NOBRE, C. A. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825-2830, 2011.

PINTO, N. L. de S. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python**. Versão 3.11. Wilmington: Python Software Foundation, 2023. Disponível em: <https://www.python.org/>.

QUEIROZ, A. et al. Análise de cenários futuros e vulnerabilidade hídrica em bacias hidrográficas antropizadas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 890-901, 2015.

SABOIA, J. P. J. et al. Projeções futuras de precipitação para a Região Metropolitana de São Paulo (bacia da UHE Edgard de Souza) no horizonte de 2024 a 2060. **Scientific Journal ANAP**, v. 2, n. 10, p. 169-181, 2024.

SALEMI, L. F. et al. Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 100-109, 2013.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Atualização do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Guarapiranga**. São Paulo: COBRAPE, 2011.

SECA prolongada deixa reservatórios de SP em estado de atenção. **Metrópoles**, Brasília, DF, 13 set. 2024. Disponível em: <https://www.metropoles.com>.

SILVA JUNIOR, R. S. et al. Análise de eventos extremos de precipitação e seus impactos em áreas urbanas no Nordeste do Brasil. **Cadernos de Geografia**, v. 32, n. 68, p. 15-32, 2022.

SOARES, Stéphanie Silva. **Repositório de dados e scripts: Efeito das mudanças climáticas sobre a frequência de ocorrência de chuvas intensas na sub-bacia Cotia-Guarapiranga – São Paulo**. Ouro Preto: UFOP, 2026. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1UBYcU46VzJe5l2hY3eCYR8GK9Yye2tn9?usp=sharing>>.

SOUSA, R. M. de et al. Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 24, p. 330-347, jan./jun. 2019.

THRASHER, B. et al. NASA Global Daily Downscaled Climate Projections (NEX-GDDP-CMIP6). **Scientific Data**, v. 9, art. 262, p. 1-10, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01393-4.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.

VIEIRA, S.; HOFFMANN, R. **Estatística Experimental**. São Paulo: Atlas, 2006.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261-272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

VISSIRINI, F. S. B. et al. Vulnerabilidade urbana e ferramentas aplicadas na gestão de risco de desastres hidrometeorológicos. **Journal of Environmental Management & Sustainability (GEAS)**, v. 12, n. 2, p. 1-37, e22616, 2023. DOI: 10.5585/2023.22616.

WHATELY, M. et al. **Guarapiranga 2005**: diagnóstico socioambiental da bacia hidrográfica. São Paulo: Instituto Socioambiental (ISA), 2006.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. WMO-No. 1203. Geneva: WMO, 2017.

APÊNDICE A - Repositório digital dos dados coletados.

Este apêndice apresenta o repositório digital contendo a base de microdados, as simulações climáticas empregados nesta pesquisa. Disponível no link de acesso:

<https://drive.google.com/drive/folders/1UBYcU46VzJe5I2hY3eCYR8GK9Yye2tn9>.