

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ALYSON MARQUES GOMES
E
MATHEUS KLEY FREIRE

Impactos das mudanças climáticas nas precipitações no estado de São Paulo:
Implicações para o dimensionamento da drenagem urbana em São Carlos (SP)

São Carlos
2025

ALYSON MARQUES GOMES

E

MATHEUS KLEY FREIRE

Impactos das mudanças climáticas nas precipitações no estado de São Paulo:
Implicações para o dimensionamento da drenagem urbana em São Carlos (SP)

Monografia apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como requisito para a obtenção do
Título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Simões Ballarin.

São Carlos

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca
Prof. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP

G633i1 Gomes, Alyson Marques
Impactos das mudanças climáticas nas precipitações no Estado
de São Paulo: implicações para o dimensionamento da drenagem
urbana em São Carlos (SP) / Alyson Marques Gomes, Matheus Kley
Freire ; orientador André Simões Ballarín -- São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.

1. Mudanças climáticas. 2. Precipitações extremas. 3. Curvas
IDF. 4. CMIP6. I. Freire, Matheus Kley. II. Ballarín, André
Simões, orient. III. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Ályson Marques Gomes e Matheus Kley Freire

Data da Defesa: 13/11/2025

Comissão Julgadora:

Resultado:

André Simões Ballarin (Orientador(a))

APROVADO

Jamil Alexandre Ayach Anache

APROVADO

Abderraman Róger Amorim Brandão

APROVADO



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornas cientistas.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com o apoio de muitas pessoas, às quais registramos nossa sincera gratidão.

Primeiramente, aos nossos pais, Lucijonas Marques, Demerval Gomes, Ursula Kley Freire e Luis Carlos Lima Freire, pelo amor, paciência e incentivo constantes, que nos sustentaram nas etapas mais desafiadoras desta jornada.

Aos professores do curso de Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo, que estiveram conosco durante toda a graduação nos ensinando. Em especial, agradecemos ao Professor André Ballarin, pela orientação atenta, pelas sugestões sempre precisas e pelas conversas que tornaram o processo mais leve e produtivo, nos possibilitando concluir o presente trabalho.

Aos nossos amigos da turma 018, que nos acompanharam desde o primeiro dia desta jornada e nos deram forças para vencer todos os obstáculos. Um agradecimento especial aos membros da República Feudo, que se tornaram nossa segunda família e nos apoiaram imensamente ao longo da graduação e no desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial do Matheus à Gabriella Moraes Pedroso, pelo amor e apoio diário nessa trajetória.

À Universidade de São Paulo, por nos proporcionar um ensino de qualidade e gratuito.

Por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para nossa formação e para a conclusão deste trabalho, o nosso verdadeiro muito obrigado.

*“Líderes são mestres em encontrar o sentido e
aprendizado em todo tipo de experiência de vida.”*

(Jucá, 2014, p. 94)

RESUMO

GOMES A. M.; e FREIRE, M. K. **Impactos das mudanças climáticas nas precipitações no estado de São Paulo**: Implicações para o dimensionamento da drenagem urbana em São Carlos (SP). 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

As mudanças climáticas impõem desafios significativos à segurança hídrica e às práticas de engenharia, alterando os regimes de precipitação. Este trabalho avalia os impactos projetados sobre a precipitação no Estado de São Paulo e as implicações diretas para o dimensionamento em São Carlos (SP). Utilizou-se o conjunto (ensemble) CLIMBra, com 19 modelos CMIP6 corrigidos por viés via Quantile Delta Mapping (QDM), comparando o período histórico (1980–2013) ao futuro (2015-2100), sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Foram analisados quatro índices de extremos (Rx1day, PRCPTOT, R1mm, R20mm) para o Estado e, em estudo de caso local, avaliadas as mudanças nas curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para São Carlos. Observa-se padrão espacial não homogêneo: tendência de redução na frequência de dias chuvosos no interior e intensificação dos extremos no sul e oeste, sugerindo concentração de volumes em menos eventos, mesmo sem grandes aumentos no total anual. Em São Carlos, os incrementos nas intensidades de projeto são moderados até a metade do século (cerca de 20–25% em tempos de retorno (TR) elevados) e substanciais no futuro distante: cerca de 28–36% no SSP2-4.5 e 55–65% no SSP5-8.5 para TR de 25-100 anos. Conclui-se que a não-estacionariedade do regime de extremos invalida premissas históricas de projeto e requer a atualização de curvas IDF e diretrizes de drenagem, com incorporação explícita de faixas de incerteza e horizontes de planejamento compatíveis.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas 1. Precipitações Extremas 2. Curvas IDF 3. CMIP6 4.

ABSTRACT

GOMES A. M.; e FREIRE, M. K. **Impacts of climate change on precipitation extremes in the state of São Paulo:** Implications for urban drainage design in São Carlos. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Climate change poses significant challenges to water security and engineering practice by altering precipitation regimes. This study evaluates the projected impacts on precipitation in the State of São Paulo and the direct implications for engineering design in São Carlos (SP). We use the CLIMBra ensemble dataset—19 CMIP6 models bias-corrected via Quantile Delta Mapping (QDM)—to compare the historical period (1980–2013) with the future (2015–2100) under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Four ETCCDI extreme-precipitation indices (Rx1day, PRCPTOT, R1mm, R20mm) are analyzed at the state scale and, in a local case study, changes in Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves are evaluated for São Carlos. A non-uniform spatial pattern emerges: a tendency toward fewer rainy days in the interior and intensification of extremes in the south and west, indicating greater rainfall volumes concentrated into fewer events even without large increases in annual totals. In São Carlos, increases in design intensities are moderate by mid-century (about 20–25% for high return periods (TR)) and substantial late-century: about 28–36% under SSP2-4.5 and 55–65% under SSP5-8.5 for TR = 25–100 years. These findings indicate that the non-stationarity of extreme-precipitation regimes invalidates historical design assumptions and calls for updated IDF curves and drainage guidelines that explicitly incorporate uncertainty ranges and appropriate planning horizons.

Keywords: Climate Change 1. Extreme Precipitation 2. IDF Curves 3. CMIP6 4.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de São Carlos.....	42
Figura 2 - Totais pluviométricos mensais em São Carlos (1961 - 1990).....	43
Figura 3 - Evolução temporal dos índices de precipitação para o Estado de São Paulo.....	47
Figura 4 - Distribuição espacial das mudanças na precipitação para o Estado de São Paulo....	49
Figura 5 - Mudança relativa na precipitação extrema de 2015 até 2055.....	51
Figura 6 - Mudança relativa na precipitação extrema de 2015 até 2100.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CABra	Catchments Attributes for Brazil
CH ₄	Metano
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project sexta fase
CO ₂	Dióxido de carbono
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ESM	Modelos Climáticos Globais
GCM	Modelos Climáticos Globais
GEE	Gases de efeito estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
N ₂ O	Óxido nitroso
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PRCPTOT	Precipitação total anual
QDM	Quantile Delta Mapping
RCM	Modelos Climáticos Regionais
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
TR	Tempo de retorno
WCRP	World Climate Research Programme
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
2	OBJETIVOS.....	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3.1	Mudanças Climáticas.....	33
3.1.1	Definição e histórico.....	33
3.1.2	Modelos Climáticos	35
3.1.3	Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6.....	37
3.2	Curva Intensidade-Duração-Frequência	33
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1	Estudo de São Paulo: Recorte físico-climático e urbanização.....	41
4.2	São Carlos: Panorama urbano-ambiental.....	42
4.3	Base de dados CLIMBra.....	44
4.3	Análise de Dados.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1	Mudanças na precipitação do Estado de São Paulo.....	47
5.2	Impactos das mudanças nas práticas de engenharia em São Carlos.....	50
5.3	Implicações para projeto e gestão da drenagem em São Carlos (2015-2100)...	53
6	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a vida e para o desenvolvimento humano, com usos múltiplos que incluem abastecimento doméstico e industrial, irrigação, geração de energia, navegação, diluição de despejos e funções ecológicas (MARENGO, 2008). No Brasil, embora a disponibilidade hídrica em escala continental seja elevada, sua distribuição espacial é desigual, a Amazônia concentra 74% da vazão superficial, mas abriga menos de 5% da população, enquanto regiões como o Nordeste registram menos de 1.200 m³/hab/ano, chegando a menos de 500 m³/hab/ano em algumas localidades (MARENGO, 2008). Essa disparidade, somada ao crescimento das demandas, acentua riscos de escassez hídrica em diferentes regiões do país (GESUALDO et al., 2021). Por outro lado, os eventos de chuvas intensas estão associados a ocorrência de inundações e alagamentos, podendo trazer diversos danos aos mais diversos sistemas naturais e humanos. Esse contraste entre cenários de falta e de excesso de água evidencia a importância de um preciso entendimento das dinâmicas de precipitação a fim de incorporar aspectos associados ao risco hídrico nas práticas de engenharia.

A variabilidade climática constitui um dos principais fatores de controle desses regimes. Oscilações associadas a El Niño–Oscilação Sul (ENOS) e às anomalias de temperatura da superfície do Atlântico já foram responsáveis por secas e cheias históricas no país, como a grande seca de 1877 no Nordeste e as enchentes no Sul em 1983 (MARENGO, 2008). Mais recentemente, eventos sem precedentes de seca e de chuvas intensas, registrados respectivamente, nas regiões Sudeste e Sul do país (COLLISCHONN et al. 2024; NOBRE et al. 2016), evidenciam ainda mais a urgência de uma melhor compreensão dos diferentes regimes de precipitação para um aprimoramento das práticas de engenharia visando a redução dos potenciais danos.

Outro aspecto essencial a ser considerado como mecanismo de controle dos regimes de precipitação são as mudanças climáticas, uma vez que representam alterações significativas nas condições e dinâmicas do clima em escalas de décadas a séculos (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2010). Relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sugerem que aquecimento global, causado principalmente pelas atividades humanas associadas ao aumento da concentração dos gases do efeito estufa, afeta de maneira significativa os padrões climáticos, acarretando aumento potencial de eventos de chuvas intensas e de escassez hídrica (MARENGO, 2008; BALLARIN et al., 2023). Essas alterações, por sua vez, afetam as práticas de engenharia e devem, portanto, ser incluídas no gerenciamento dos recursos hídricos (BALLARIN et al. 2022).

Em escala nacional, estudos recentes sugerem diferentes impactos nos recursos hídricos decorrentes das mudanças climáticas, (Ballarin et al. (2023) indicam que 81% das bacias brasileiras podem sofrer redução da segurança hídrica até 2100, em cenários de aquecimento, considerando tanto diminuição da oferta quanto aumento da demanda de água. Ao mesmo tempo, tendências regionais já identificadas no passado, como maior vulnerabilidade da Amazônia e do Nordeste à seca e à intensificação das chuvas no Sul (MARENGO, 2008) encontram respaldo nas projeções mais recentes que incorporam aspectos associados às mudanças climáticas. Esses resultados refletem a combinação de pressões climáticas e antrópicas e revelam que a segurança hídrica não depende apenas da quantidade de água, mas também da qualidade, frequentemente comprometida por múltiplos vetores de contaminação (BALLARIN et al., 2023).

Em escala de bacia, análises hidrológicas reforçam esses diagnósticos. Um estudo conduzido por Mattos et al. (2025) na bacia do Passaúna, responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de Curitiba, revelou aumento significativo nos picos de cheia, elevações de até 26% em cenários intermediários e até 52% em cenários extremos em termos de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, os regimes tendem a se prolongar por até dois meses adicionais, enquanto as vazões de estiagem não apresentaram mudanças expressivas (MATTOS et al., 2025). Esses resultados ilustram, em escala local, os padrões mais amplos identificados em estudos nacionais e internacionais, demonstrando a não estacionariedade dos extremos hidrológicos em um contexto de mudança climática.

Diante desse panorama de múltiplos desafios impostos à segurança hídrica brasileira pelas mudanças do clima, este trabalho busca analisar como as mudanças climáticas e consequentes alterações nos padrões de precipitação podem afetar as práticas de engenharia. Especificamente, esse estudo busca caracterizar (i) as alterações futuras de precipitação no estado de São Paulo, e posteriormente, avaliar (ii) como essas mudanças podem afetar as práticas de engenharia, expressas em termos da construção de curvas de intensidade, duração e frequência.

2 OBJETIVOS

Considerando a contextualização apresentada na Introdução, o objetivo central deste trabalho é avaliar os potenciais impactos das mudanças climáticas sobre a dinâmica de precipitação no Estado de São Paulo e realizar um estudo de caso de suas consequências diretas para as práticas de engenharia na cidade de São Carlos.

Para tanto, o estudo busca, em primeiro lugar, caracterizar as alterações futuras de precipitação no estado de São Paulo, analisando simulações climáticas ao longo de períodos históricos e futuros. A caracterização é feita quantificando as mudanças projetadas em indicadores de extremos, abrangendo a precipitação máxima diária, totais anuais, frequência de dias chuvosos e ocorrência de chuvas intensas, com foco em cenários de aquecimento acentuado.

Em segundo lugar, o trabalho objetiva avaliar como essas mudanças climáticas podem afetar as práticas de engenharia, o que é realizado por meio de uma análise local na cidade de São Carlos: a determinação e comparação das Curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) entre os cenários histórico e futuro, visando analisar as alterações nas intensidades de projeto em diferentes tempos de retorno.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mudanças climáticas

3.1.1 Definição e histórico

As mudanças climáticas são definidas como alterações estatisticamente significativas no estado médio ou na variabilidade do clima, mantidas ao longo de décadas ou séculos (IPCC, 2014). Essa definição é importante para diferenciá-las da variabilidade climática, que consiste em oscilações naturais em períodos mais curtos, como anos ou décadas, e das anomalias, que são desvios temporários em relação ao padrão histórico (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2010). Nesse sentido, as mudanças climáticas constituem tendências persistentes que modificam a dinâmica do sistema climático e afetam a atmosfera, os recursos hídricos, os ecossistemas e as populações humanas (IPCC, 2021).

Estudos paleoclimáticos mostram que o clima da Terra nunca foi estático. Testemunhos de gelo da Antártida indicam que nos últimos 420 mil anos o planeta passou por oscilações de até 10 °C entre períodos glaciais e interglaciais (PETIT et al., 1999). Essas variações decorreram de fatores naturais. No entanto, a taxa de aquecimento observada desde a Revolução Industrial não encontra precedentes, com elevação de aproximadamente 1 °C em apenas 250 anos (BURSZTYN; RODRIGUES FILHO; SAITO, 2016). Esse aumento acelerado está diretamente relacionado às atividades humanas. Entre as principais causas estão a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, a agropecuária intensiva e a industrialização, que aumentaram a concentração de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2013). O efeito estufa natural mantém a temperatura média global em torno de 14 °C, o que garante condições adequadas para a vida. Sem ele, a temperatura média da Terra seria próxima de -18 °C (BRASIL, 2018). Entretanto, o excesso de GEE intensifica o aquecimento global e gera desequilíbrios que podem perdurar por séculos (IPCC, 2013).

O reconhecimento da gravidade do problema levou à criação, em 1988, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), por iniciativa da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) (IPCC, 2022c). O IPCC organiza-se em três grupos de trabalho: o primeiro avalia as bases físicas do clima; o segundo trata de impactos, adaptação e vulnerabilidade; e o terceiro discute medidas de mitigação necessárias para enfrentar o cenário desafiador das mudanças

climáticas. Há também uma força-tarefa responsável pelos inventários nacionais de emissões (IPCC, 2021).

Os relatórios do IPCC demonstram o agravamento das mudanças climáticas. O AR4 apontou que 11 dos 12 anos mais quentes já registrados desde 1850 ocorreram entre 1995 e 2006 (IPCC, 2007). O AR5 projetou aumentos de temperatura de 1,8 °C a 4 °C até 2100, a depender dos cenários de emissões, que definem diferentes trajetórias de emissões e, consequentemente, diferentes intensidades de mudanças (IPCC, 2014). O AR6 reforçou que é inequívoca a influência humana no aquecimento da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre, além de destacar que eventos extremos, como secas e chuvas intensas, estão se tornando mais frequentes (IPCC, 2021). É importante ressaltar que os relatórios do IPCC não produzem novos dados nem conduzem pesquisas próprias; em vez disso, eles resultam de um processo de síntese e revisão da literatura científica disponível, envolvendo especialistas de diferentes áreas para assegurar a representatividade e a robustez das conclusões apresentadas.

De fato, os impactos relatados pelos relatórios do IPCC vêm sendo observados em escala global. O aquecimento intensifica ondas de calor, estiagens prolongadas, chuvas extremas e ciclones tropicais (IPCC, 2021). O nível do mar aumenta devido ao derretimento de geleiras e à expansão térmica dos oceanos, e a acidificação dos mares ameaça os ecossistemas marinhos (IPCC, 2014). Em relação aos recursos hídricos, estima-se que até 2025 cerca de 1,8 bilhão de pessoas viverão em regiões com escassez crítica de água, e dois terços da população mundial enfrentarão algum nível de estresse hídrico resultantes tanto de mudanças nas dinâmicas climáticas como da intensificação das atividades humanas (UNESCO, 2003).

No Brasil, o cenário não é diferente. De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), são projetados aumentos de até 5,5 °C na temperatura média e reduções de até 50% na precipitação em algumas regiões até o fim do século XXI (PBMC, 2014). Os biomas mais vulneráveis são a Amazônia, o Cerrado e a Caatinga (PBMC, 2014). No Cerrado, a substituição da vegetação nativa por áreas agrícolas reduziu a evapotranspiração, intensificou o aquecimento regional e prolongou a estação seca (FOLEY et al., 2005; MALHI; WRIGHT; NIN, 2004). Esses processos, somados ao aquecimento global, aumentam a aridez e afetam a frequência e a intensidade das secas, que, por sua vez, comprometem a segurança hídrica, energética e alimentar, afetando de forma desigual regiões e populações (PBMC, 2014; MARENGO, 2008). (SAMPAIO et al., 2007).

Em contrapartida, em outras regiões, eventos extremos, como chuvas intensas, se intensificarão. De acordo com Medeiros et al. (2022), há um consenso entre diferentes gerações de modelos climáticos (CMIP3–CMIP6) de que extremos de precipitação tendem a se tornar

mais severos, frequentes e duradouros em todas as macrorregiões do país, com sinal mais pronunciado na porção centro-norte e no setor Sul. Em linhas gerais, as projeções apontam uma reorganização do regime de precipitação: eventos leves a moderados tendem a diminuir, enquanto os extremos se tornam mais comuns, e a mudança projetada é guiada sobretudo pela frequência de ocorrência desses eventos (BALLARIN et al., 2024). Por exemplo, de acordo com os autores, eventos extremos com alto período de retorno, utilizados no dimensionamento de infra-estruturas hidráulicas, se tornarão mais frequentes e ligeiramente mais intensos até o fim do século, reforçando a necessidade de considerar esses ajustes em avaliações de risco (BALLARIN et al., 2024). Portanto, essa reorganização, resultante da concentração da precipitação total em um número menor de eventos reforça o potencial de agravamento de impactos e de sobrecarga de serviços, exigindo políticas de adaptação e mitigação articuladas, inclusive para reduzir danos associados, como deslizamentos, e aprimorar o planejamento urbano sob uma perspectiva de sustentabilidade (MEDEIROS; OLIVEIRA; AVILA-DIAZ, 2022).

Assim, embora o clima tenha sido influenciado por fatores naturais ao longo da história, a intensificação recente é atribuída principalmente às atividades humanas (IPCC, 2013; IPCC, 2021). O consenso estabelecido nos relatórios do IPCC e do PBMC evidencia que os impactos são crescentes - tanto em um contexto global como nacional - e, portanto, exigem medidas urgentes de mitigação e adaptação (IPCC, 2021; PBMC, 2014).

3.1.2 Modelos climáticos

Os modelos climáticos são representações matemáticas do sistema do clima, atmosfera, oceanos, superfície continental e criosfera, construídas a partir das leis de conservação de massa, energia e momento, com a finalidade de compreender a variabilidade e projetar mudanças em distintas escalas temporais (IPCC, 2012). Em aplicações públicas e setoriais, esses modelos subsidiam avaliações de risco e planejamento, ao quantificar respostas do sistema a diferentes forçantes naturais e antrópicas (FLATO et al., 2013).

Do ponto de vista tipológico, Modelos Climáticos Globais (Global/General Circulation Models, GCM) resolvem numericamente as equações que governam a circulação e as trocas de energia e massa em uma grade tridimensional que cobre todo o globo (FLATO et al., 2013). Já os Modelos Climáticos Regionais (Regional Climate Models, RCM) aplicam a mesma física em domínios limitados, fornecendo maior detalhe espacial para análises em escala regional e local (IPCC, 2014).

A resolução ainda relativamente grosseira dos GCM dificulta a representação de fenômenos associados à topografia e à convecção, como a precipitação orográfica e a distribuição espaço-temporal de eventos intensos (MARAUN et al., 2010). Para processos sub-resolvidos, recorre-se a parametrizações, por exemplo, microfísica de nuvens, que introduzem vieses e exigem cautela quando se aplicam correções estatísticas a suas saídas (EHRET et al., 2012). Em regiões tropicais, persistem dificuldades na simulação de gradientes regionais e do ciclo anual de chuva, o que impacta diagnósticos e projeções (BOMBARDI; CARVALHO, 2009).

As projeções carregam incertezas de diferentes fontes (estrutura do modelo, parâmetros e condições de contorno), razão pela qual é prática consolidada combinar resultados de vários modelos em ensembles multi-modelo, que tendem a produzir estimativas mais robustas do que as obtidas por um único membro (TEBALDI; KNUTTI, 2007). Contudo, interdependências entre modelos podem levar a “falsa concordância” quando códigos ou componentes são compartilhados, recomendando-se ponderações por desempenho e independência (SANDERSON; KNUTTI; CALDWELL, 2015).

A avaliação dos modelos utiliza métricas padronizadas que comparam a simulação histórica com observações, climatológicas médias, variâncias, correlações e erros (por exemplo, viés e erro quadrático médio), além de diagnósticos de modos de variabilidade como o fenômeno do El Niño (GLECKLER; TAYLOR; DOUTRIAUX, 2008). Para extremos climáticos, índices desenvolvidos pelo Expert Team on Climate Change Detection and Attribution (ETCCDI) são comumente empregados a fim de determinar o desempenho dos modelos na representação de eventos extremos, permitindo analisar não apenas médias, mas também a variabilidade e a frequência de eventos (DONAT et al., 2013; DUNN et al., 2020).

Para transpor a informação global às escalas de decisão e considerar as incertezas dos modelos, aplicam-se técnicas de redução de escala, comumente chamadas de downscaling. O downscaling dinâmico aninha modelos climáticos regionais (RCM) - que conseguem representar de maneira mais precisa dinâmicas climáticas locais - à modelos climáticos globais (GCM), elevando a resolução espacial ao custo de maior demanda computacional (MARAUN et al., 2010). O downscaling estatístico, por sua vez, estabelece relações empíricas entre variáveis de grande escala e condições locais. De maneira resumida, os métodos estatísticos se baseiam em equações de transferência matemática com intuito de aproximar as propriedades estatísticas da variável simulada das propriedades estatísticas da variável observada. Entre os métodos, o quantile mapping é amplamente adotado em aplicações hidrológicas (SHRESTHA; ACHARYA; SHRESTHA, 2017; SHRESTHA et al., 2020).

A compreensão e a projeção dessas mudanças têm como principal ferramenta os modelos climáticos. A evolução dos antigos Modelos de Circulação Geral (GCMs) para os atuais Modelos de Sistema Terrestre (ESMs) representou um salto na capacidade de simular interações entre atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera, ampliando o escopo das análises (BALLARIN, 2024). Contudo, persistem limitações na simulação de processos regionais, como precipitação convectiva e efeitos de topografia, que demandam parametrizações e podem introduzir vieses (BALLARIN, 2023). Essas limitações têm implicações diretas sobre o planejamento hídrico, uma vez que os impactos são sentidos de forma heterogênea, em escalas locais e regionais (MARENGO, 2008).

3.1.3 Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6

A sexta fase do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) representa a etapa mais madura do esforço de intercomparação de modelos do World Climate Research Programme (WCRP), consolidando um desenho experimental que amplia a coerência entre experimentos, cenários e avaliação multimodelo em relação às fases anteriores (EYRING et al., 2016). Essa evolução sucede à transição histórica dos cenários SRES (CMIP3) para RCPs - Representative Concentration Pathways (CMIP5) e, agora, para as Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), que conectam narrativas socioeconômicas a metas de forçamento radiativo, aproximando projeções climáticas de questões de mitigação e adaptação consideradas nos relatórios do IPCC (IPCC, 2000; IPCC, 2021). Em termos práticos, a mudança para as SSPs permite organizar os futuros climáticos a partir de trajetórias plausíveis de desenvolvimento, mantendo comparabilidade entre centros e experimentos (O'NEILL et al., 2014).

No CMIP6, as SSPs estruturam a família de cenários que, combinadas a níveis-alvo de forçamento em 2100, compõem um quadro integrado de avaliação (RIAHI et al., 2017). Esse quadro é operacionalizado pelo ScenarioMIP, que define a malha comum de experimentos e as regras de combinação cenário-modelo, garantindo uma base consistente para análises intercomparativas (TEBALDI et al., 2021). Na prática, quatro combinações têm sido amplamente utilizadas para o século XXI: SSP1-2.6 (limite inferior e atualização do RCP2.6), SSP2-4.5 (intermediário), SSP3-7.0 (médio-alto) e SSP5-8.5 (limite superior), permitindo explorar respostas do sistema climático sob faixas contrastantes de forçamento (IPCC, 2021).

Comparado ao CMIP5, o CMIP6 avançou em documentação, padronização e transparência, com maior clareza sobre as configurações dos modelos e sobre o desenho dos experimentos (EYRING et al., 2016). Além disso, a janela histórica foi estendida para começar

em 1850, e as projeções futuras cobrem 2015–2100, ainda que persista diversidade de resoluções e escolhas de parametrização entre centros, por razões científicas e computacionais (TEBALDI et al., 2021; FLATO et al., 2013). Essa combinação de um protocolo comum com autonomia de projeto dá robustez às comparações sem eliminar a variedade estrutural, que é também fonte de incerteza (FLATO et al., 2013).

No contexto dessas padronizações, o CMIP6 reforça a necessidade de tratar explicitamente vieses e incertezas: muitos decorrem de limitações de conhecimento, parametrizações e decisões de projeto e tendem a apresentar estabilidade relativa entre simulações históricas e futuras; por isso, a caracterização prévia desses vieses é etapa indispensável antes da seleção de modelos para aplicações setoriais (TEBALDI; KNUTTI, 2007; LORENZ et al., 2018). Como detalhado na Seção 3.1.2, aplica-se um conjunto padronizado de métricas e procedimentos de avaliação, assegurando comparabilidade entre centros e experimentos.

No AR6/WGI, relatório elaborado para resumir as principais conclusões da literatura a respeito das mudanças climáticas, as projeções dos modelos climáticos do CMIP6 foram as restrições observacionais e a uma avaliação atualizada de sensibilidade climática, o que fortalece a consistência dos padrões espaciais quando se compara um mesmo nível global de aquecimento entre cenários (IPCC, 2021). Os resultados de síntese indicam que 2 °C (relativos a 1850–1900) seriam excedidos no século XXI sob cenários de emissões altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) e que é extremamente provável excedê-los também sob SSP2-4.5; por outro lado, é extremamente improvável exceder 2 °C sob SSP1-1.9 e improvável sob SSP1-2.6 (IPCC, 2021). A mensagem central permanece: emissões futuras implicam aquecimento adicional e o CO₂ domina o aquecimento total, com papéis relevantes de outros gases e de aerossóis (IPCC, 2021).

A utilidade do CMIP6 torna-se mais evidente quando suas saídas são traduzidas para decisões regionais e setoriais. Os procedimentos de seleção de subconjuntos, redução de escala e correção de viés seguem o arcabouço já descrito na Seção 3.1.2, podendo apoiar-se em ferramentas que tornam a triagem mais transparente e documentada, como o GCMeval (PARDING et al., 2020).

Em síntese, o CMIP6 consolidou a família SSP como eixo da arquitetura de cenários, reforçou padronização e transparência do desenho experimental e integrou-se a sínteses do AR6 que combinam projeções multimodelo com evidências observacionais (TEBALDI et al., 2021; IPCC, 2021). Seu valor para políticas públicas e planejamento emerge da combinação entre um protocolo comum robusto, infraestrutura de dados e avaliação, e um ecossistema de métricas e

ferramentas que dá lastro às interpretações, sempre reconhecendo limites, interdependências e a necessidade de avaliações críticas e transparentes (EYRING et al., 2016; SANDERSON; KNUTTI; CALDWELL, 2015).

3.2 Curva Intensidade-Duração-Frequência

Chuvas de projeto são eventos idealizados para dimensionamento e verificação de obras de drenagem urbana e apoio a decisão e gestão dos recursos hídricos. Caracterizam-se por fornecerem informações acerca da (i) duração do evento, (ii) intensidade média e (iii) distribuição temporal da precipitação. Na prática, a duração de uma chuva de projeto costuma ser da ordem do tempo de concentração da bacia ou área de contribuição de interesse; a intensidade média é estimada por uma curva IDF para um dado tempo de retorno (TR); e a distribuição temporal é definida após a escolha de t e TR. (CANHOLI, 2015).

Sendo assim, as curvas IDF são essenciais para as práticas de engenharia no país, especialmente por serem aspectos essenciais para a definição de chuvas de projeto. Elas relacionam intensidade, duração e frequência (probabilidade de excedência), observando-se que intensidades maiores tendem a ocorrer em durações menores e com menor probabilidade; obtêm-se a partir de longas séries de máximas diárias regionais representativas (TUCCI, 2007; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Em geral, a forma funcional empregada é descrita na equação abaixo.

$$i = \frac{a \times TR^b}{(t + c)^d}$$

Onde:

- i : Intensidade média (mm/h);
- TR: Período de retorno (anos);
- t : Duração (min);
- a, b, c, d : Parâmetros locais

Após definida a IDF, a partir da definição dos parâmetros a, b, c e d , pode-se determinar a intensidade média de chuva para qualquer duração e período de retorno de interesse.

Inicialmente, para a construção de uma curva IDF, se faz necessário definir a altura de precipitação associada a diferentes períodos, considerando uma duração de evento específica (em geral, chuva diária). Para isso, devido a limitação amostral dos dados observacionais, deve-se empregar alguma distribuição de probabilidade que seja capaz de representar a relação entre

probabilidade de ocorrência e alturas de precipitação observadas. No Brasil, a distribuição mais utilizada é a distribuição de Gumbel. Definida a distribuição a ser utilizada, prossegue-se para a etapa de estimativa dos parâmetros da distribuição, a fim de obter uma distribuição que seja capaz de descrever essa relação entre altura e probabilidade matematicamente. Definidos os parâmetros e verificado o ajuste da distribuição, procede-se para a estimativa de altura de precipitação para diferentes períodos de retorno (frequência de ocorrência). Esse processo então é repetido para diferentes durações de precipitação (subdiárias, horárias). Entretanto, como as séries disponíveis no país são frequentemente diárias, se faz necessário utilizar métodos de desagregação para obter as alturas de precipitação associadas a diferentes períodos de retorno para as durações sub-diárias - obtidas previamente através da distribuição Gumbel utilizando dados diários (BARBASSA, 1991; CETESB, 1979).

Como exemplo contextual, a literatura de São Carlos (SP) reúne IDFs com parâmetros distintos, reflexo de bases de dados e procedimentos metodológicos de épocas diversas, do trabalho pioneiro de Barbassa às compilações recentes de Cavalcanti, Silva e Reis; esse histórico reforça a necessidade de revisões periódicas com a gestão transparente dos dados (BARBASSA, 1991; CAVALCANTI; SILVA; REIS, 2015).

Em síntese, a elaboração de IDFs e chuvas de projeto inicia com a curadoria das séries e o ajuste probabilístico dos máximos, prossegue com a desagregação para durações subdiárias e a seleção do hietograma coerente com a IDF local e, quando pertinente, incorpora a atualização sob cenários climáticos (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Estado de São Paulo: Recorte físico-climático e urbanização

O Estado de São Paulo situa-se na faixa latitudinal subtropicais do Sudeste do Brasil e apresenta sazonalidade hídrica marcada, com estação chuvosa concentrada da primavera ao outono e estação seca no inverno. A distribuição intra-anual das chuvas é comandada por sistemas como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a passagem de frentes frias, entre outros distúrbios que modulam episódios de precipitação intensa. Essa dinâmica é consolidada na literatura regional desde os estudos clássicos sobre a dinâmica climática paulista e as análises da circulação atmosférica associada à ZCAS e aos sistemas frontais na América do Sul (MONTEIRO, 1973; CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004).

Além da sazonalidade, há gradientes climáticos associados ao relevo e à continentalidade que criam transições do litoral para o interior e do sul para o norte paulista, refletindo-se na atuação diferenciada dos sistemas atmosféricos e na organização espacial das chuvas (MONTEIRO, 1973; ROSS; MOROZ, 1997). Em termos climáticos, o estado combina domínios de Köppen de caráter tropical e subtropical úmido, com verões mais quentes e chuvosos e inverno relativamente mais seco, além de um gradiente térmico norte-sul descrito na literatura (ALVARES et al., 2013; BRASIL, 1992). No verão, episódios persistentes de precipitação tendem a ocorrer quando faixas de convergência de umidade se estabelecem sobre o Sudeste e interagem com frentes frias, ao passo que o inverno apresenta condições mais estáveis, com incursões frias ocasionais (REBOITA et al., 2010; RAO et al., 2016).

Do ponto de vista urbano, o território paulista congrega metrópoles e centros regionais cuja expansão e forma de ocupação influenciam processos meso e microclimáticos, com efeitos sobre temperatura do ar, balanço de energia e escoamento superficial, como demonstra a literatura de climatologia urbana (OKE, 1982; ARNFIELD, 2003).

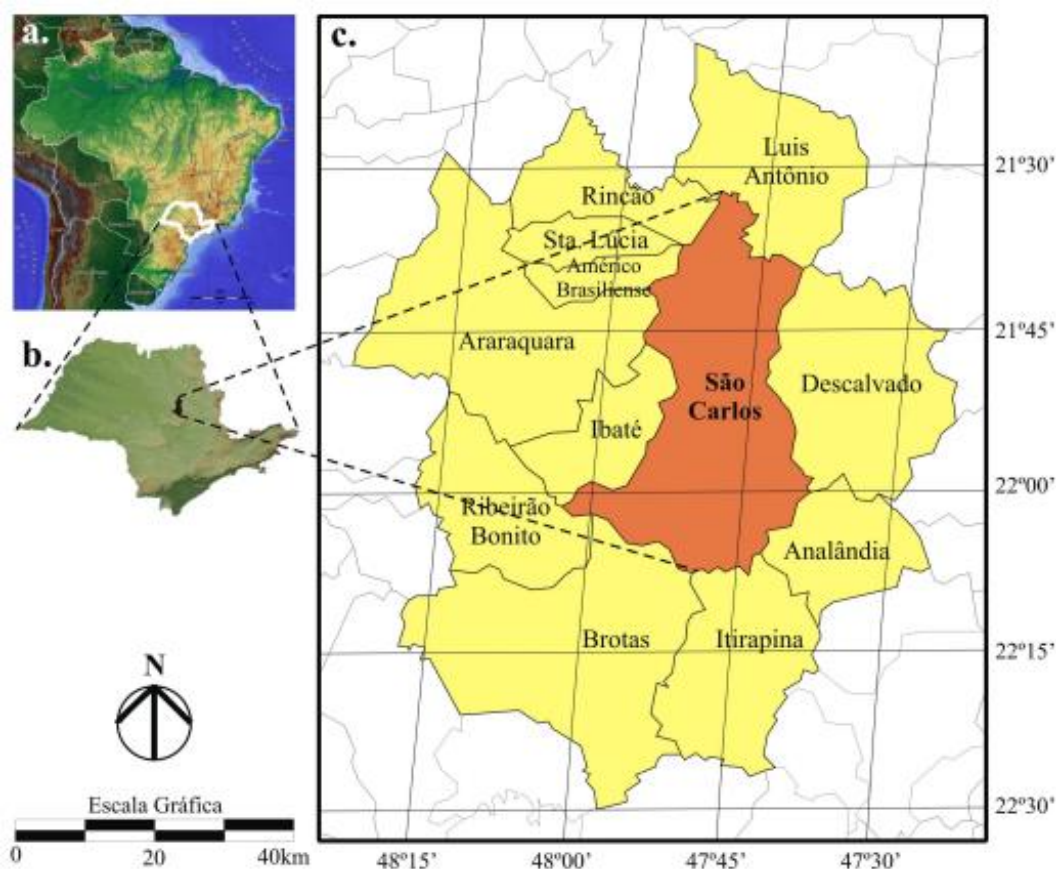
Em escala estadual, episódios de chuva intensa são modulados por sistemas como a Zona de Convergência do Atlântico Sul e, sobretudo no período quente, por sistemas frontais, que respondem por parcela expressiva dos eventos extremos no Sudeste (LIMA; SATYAMURTY; FERNÁNDEZ, 2010; RAO et al., 2016). Estudos para o Estado de São Paulo indicam tendências de intensificação dos volumes e aumento da frequência de dias com precipitações elevadas, por exemplo, acima de 40 mm, com reconfiguração de padrões sazonais e extremos (SUGAHARA; ROCHA; SILVEIRA, 2009; SILVA DIAS et al., 2013). Essa combinação de maior recorrência de chuvas intensas com a impermeabilização e adensamento

urbanos pressiona a drenagem e eleva a suscetibilidade a alagamentos nas bacias urbanas paulistas; em São Carlos, por exemplo, a bacia do Gregório já foi historicamente analisada quanto ao vínculo entre ocupação do solo e enchentes, evidenciando o desafio na escala local (MENDES, 2005; REBELATTO, 1991).

4.2 São Carlos: Panorama urbano-ambiental

Localizado no centro do estado, São Carlos é classificado como cidade de porte médio, com papel de centro regional e forte integração viária. O município situa-se entre $21^{\circ}35'45''$ – $22^{\circ}09'30''$ S e $47^{\circ}43'04''$ – $48^{\circ}05'26''$ W, limita-se a Rincão, Luís Antônio e Santa Lúcia (N), Ribeirão Bonito, Itirapina e Brotas (S), Descalvado e Analândia (L) e Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense (O), conforme Figura 1. A área central do município encontra-se em cota de maior altitude (≈ 856 m). (PMSC, 2018).

Figura 1 – Localização do município de São Carlos



Fonte: BARBOSA (2009).

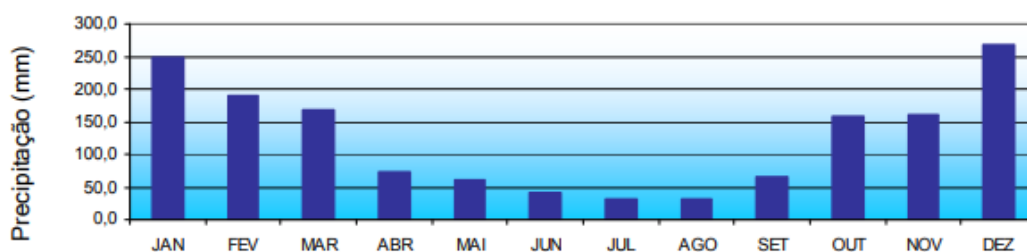
O recorte demográfico recente indica densidade urbana dominante e população superior a 220 mil habitantes no Censo 2010, com a maior parte dos moradores em áreas urbanas (IBGE, 2019). Essa configuração foi impulsionada por ciclos econômicos e pela infraestrutura, notadamente a ferrovia e serviços que estruturaram a expansão do tecido construído e a ocupação de topos e fundos de vale ao longo do século XX (NEVES, 2007).

Do ponto de vista geoambiental, São Carlos situa-se na borda oeste das Cuestas Basálticas, em transição para o Planalto Ocidental, condição que estrutura o relevo regional e enquadra o município em compartimentos de escarpas e reversos (ROSS; MOROZ, 1997). Essa compartimentação organiza interflúvios e vales e orienta a drenagem superficial, descrita em mapeamentos estaduais de detalhe para o interior paulista (IPT, 1981).

Essa mesma configuração de relevo e rede de drenagem, combinada à ocupação histórica de topos e fundos de vale, tende a acelerar o escoamento superficial, reduzir tempos de concentração e ampliar a vulnerabilidade a inundações nas bacias urbanas (NEVES, 2007; REBELATTO, 1991). Além disso, a variação altimétrica e a posição nos compartimentos geomorfológicos reforçam a heterogeneidade térmica do tecido urbano, recomendando que análises e intervenções considerem explicitamente os condicionantes topográficos, altitude, exposição e localização em vertentes e vales, sobre o comportamento térmico local (ALMEIDA, 1964).

No plano hidrometeorológico, em São Carlos o regime pluviométrico é nitidamente sazonal, com totais anuais da ordem de 1.500 milímetros e forte concentração de chuvas no semestre quente: cerca de 79% entre outubro e março (≈ 1.193 mm) contra $\sim 21\%$ entre abril e setembro (≈ 302 mm), caracterizando verão chuvoso e inverno relativamente seco (BRASIL, 1992; MONTEIRO, 1973) conforme Figura 2.

Figura 2 – Totais pluviométricos mensais em São Carlos (1961-1990)



Fonte: BARBOSA (2009).

Na estação úmida, episódios persistentes de precipitação tendem a ocorrer quando faixas de convergência de umidade (ZCAS) se estabelecem sobre o Sudeste e interagem com frentes frias; em escala regional, esses sistemas respondem por parcela expressiva das chuvas intensas

observadas (REBOITA et al., 2010; LIMA; SATYAMURTY; FERNÁNDEZ, 2010). Em séries recentes da área de estudo (1979-2017), análises com índices diários indicam aumento na ocorrência de episódios extremos e variações no calendário da estação chuvosa, em associação à variabilidade de grande escala (SANCHES, 2019; RAO et al., 2016).

Esse conjunto de evidências, somado ao padrão sazonal descrito, sustenta a necessidade de acompanhar tendências e possível não estacionariedade em séries de precipitação extrema, especialmente para aplicações em hidrologia urbana e parâmetros de projeto (SUGAHARA; ROCHA; SILVEIRA, 2009).

Esse pano de fundo é relevante para a engenharia urbana, pois a intensificação/recorrência de extremos diários tem sido discutida para o Estado de São Paulo e para o Sudeste, inclusive com indícios de não-estacionariedade na frequência de precipitações extremas (SUGAHARA; ROCHA; SILVEIRA, 2009). Identificam-se também alterações em extremos de precipitação em séries recentes, o que reforça a necessidade de reavaliar premissas de projeto (SILVA DIAS et al., 2013). Para realidades municipais como São Carlos, isso torna pertinente discutir possíveis ajustes em curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e parâmetros de dimensionamento, ancorando-se em séries locais de longa duração e em metodologias consolidadas. É nesse contexto que o presente trabalho se insere, buscando avaliar o impacto da não-estacionariedade na estimativa das curvas IDF para a região de São Carlos.

4.3 Base de dados CLIMBra

Aqui está a versão reescrita. A referência a **Almagro et al. (2021)** foi inserida naturalmente ao mencionar o dataset CABra, mantendo a estrutura original do seu texto .

Como já mencionado, modelos climáticos são as ferramentas mais avançadas para investigar as respostas climáticas a cenários futuros de emissões de gases de efeito estufa, desempenhando o papel de projetar o clima ao longo do século. No entanto, as projeções climáticas são dependentes do modelo e podem apresentar vieses sistemáticos, exigindo uma correção de viés para qualquer aplicação futura.

Para superar essas limitações, o presente estudo emprega o dataset CLIMBra (Ballarin et al., 2023), que fornece um conjunto (ensemble) de 19 projeções de modelos climáticos CMIP6 corrigidos por viés para o território brasileiro. O dataset inclui as simulações históricas (1980–2013) e futuras (2015–2100) em uma resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, cobrindo os cenários SSP 2-4.5 (intermediário) e SSP 5-8.5 (limite superior). Para a correção do viés nas

séries temporais diárias de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar líquida, velocidade do vento próxima à superfície e umidade relativa, foi utilizada a abordagem Quantile Delta Mapping (QDM). Além do produto em grade (gridded product), o CLIMBra fornece projeções com média de área para 735 bacias hidrográficas incluídas no dataset Catchments Attributes for Brazil (CABra), apresentado por Almagro et al. (2021), oferecendo variáveis importantes para estudos hidroclimatológicos e ambientais.

4.4 Análise de Dados

Alinhada aos objetivos (Seção 2), a análise de dados foi estruturada em duas etapas: (i) caracterização da dinâmica de chuvas no Estado de São Paulo; e (ii) avaliação das mudanças esperadas nas curvas IDF, considerando a cidade de São Carlos como estudo de caso.

A primeira etapa foi realizada através do cálculo de quatro indicadores anuais de extremos de precipitação, amplamente utilizados em diagnósticos hidroclimáticos, para os períodos histórico e futuro período histórico (1980–2013) e o futuro (2015–2100): (i) máximo de precipitação diária anual (R_{x1day}); (ii) precipitação total anual (PRCPTOT); (iii) número de dias chuvosos ($R1mm$: dias com $P \geq 1$ mm); e (iv) número de dias com chuva intensa ($R20mm$: dias com $P > 20$ mm). Esses indicadores, propostos originalmente pelo ETCCDI (Zhang et al., 2011), permitem relacionar alterações na intensidade e, especialmente, na frequência de ocorrência de eventos ao longo da distribuição de chuvas.

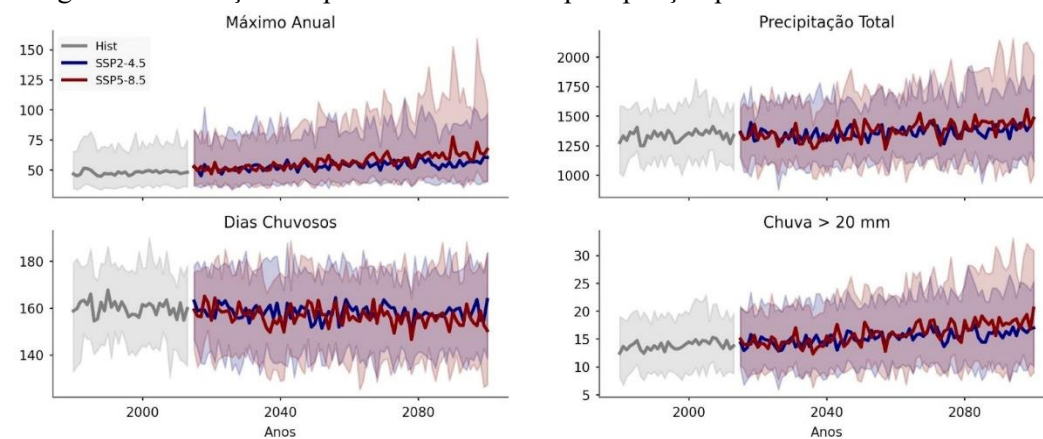
Já na segunda etapa, cujo objetivo foi avaliar os potenciais impactos das mudanças climáticas nas práticas de engenharia, foi realizado um experimento local para a cidade de São Carlos (SP), a fim de determinar as potenciais alterações nos eventos extremos de precipitação associados a diferentes períodos de retorno. Especificamente, foram comparadas a altura de precipitação associada aos períodos de retorno (TR) de 2, 10, 25, 50 e 100 anos entre os períodos históricos (1980-2013) e futuro próximo (2015-2055) ou distante (2055-2100). Essa divisão entre os períodos futuros se faz necessária para considerar os diferentes horizontes de projetos típicos em obras de engenharia, bem como as diferentes dinâmicas esperadas nas mudanças climáticas. Dessa forma, os tomadores de decisão conseguiram optar pela melhor opção a ser considerada, dependendo do tipo de obra, horizonte de projeto e vida útil, entre outros aspectos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mudanças na precipitação do Estado de São Paulo

A evolução temporal dos índices de precipitação para o estado de São Paulo de acordo com as projeções de 19 modelos climáticos presentes na base de dados CLIMBra foram disponibilizadas na Figura 3. As áreas hachuradas indicam o intervalo de confiança de 90%, representando a variabilidade nas projeções provenientes de diferentes modelos climáticos presentes na base CLIMBra. É importante ressaltar que, ao longo dos anos futuros projetados, as incertezas associadas às projeções aumentam, corroborando com a literatura que sugere uma maior incerteza no fim do século, especialmente associada à definição dos cenários climáticos, já as linhas sólidas representam a mediana multimodelo. As simulações para o período histórico estão representadas em cinza. Já para o período futuro, as simulações foram representadas em azul e vermelho, para os cenários SSP 2-4.5 (moderado) e SSP 5-8.5 (pessimista), respectivamente.

Figura 3 – Evolução temporal dos índices de precipitação para o Estado de São Paulo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No gráfico direcionado para o índice de precipitação máxima anual, a projeção da mediana multimodelo mostra uma semelhança entre os cenários até cerca de 2040, seguida de uma pequena variação nos anos subsequentes. Entretanto, no fim do século, após 2080, observa-se uma diferença maior entre os cenários, sendo a precipitação máxima anual projetada para o cenário SSP5-8.5 com aumentos na mediana da ordem de 20-40% referentes à média histórica (valores próximos de 50% aparecem apenas dentro da faixa dos modelos). Como esperado, para

o cenário intermediário, SSP2-4.5, o aumento projetado possui menor magnitude, ainda que relevante.

A quantidade de precipitação total tem sua mediana projetada para permanecer próxima à série histórica, variando aproximadamente entre 1300 e 1500 mm. Porém a partir de 2040, no cenário pessimista SSP5-8.5, observa-se um alargamento da faixa de incerteza (espalhamento entre os modelos) no gráfico, o que indica maior dispersão entre projeções; inferências sobre secas mais severas e anos mais chuvosos exigem análise específica da variabilidade interanual e de índices de seca. Apesar de diferenças esperadas na variabilidade entre modelos (intervalo de confiança), ambos cenários sugerem um leve aumento da precipitação total ao final do século para o estado de São Paulo, não havendo, entretanto, diferenças significativas entre eles.

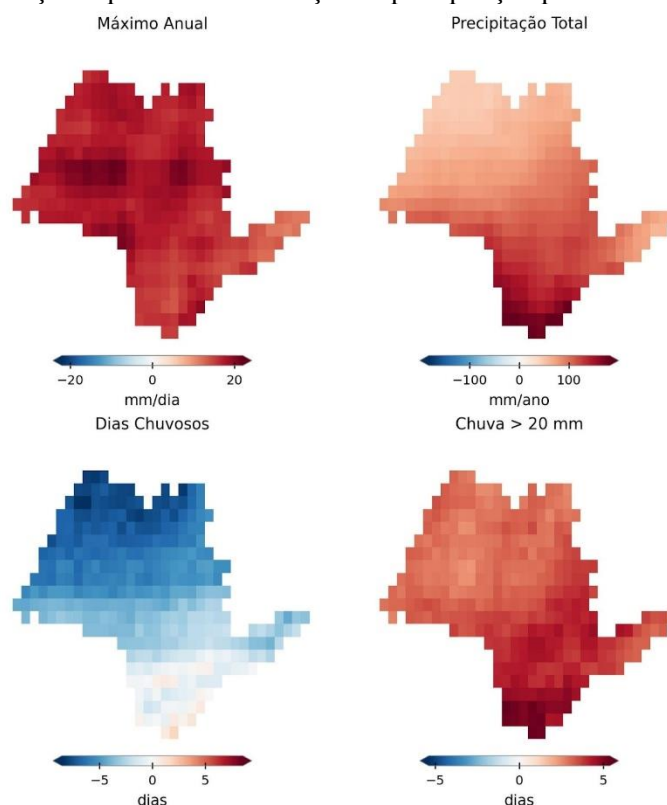
Na projeção para a quantidade de dias chuvosos no ano, observa-se uma diminuição para ambos os cenários, de maneira mais acentuada no cenário pessimista. Por exemplo, de acordo com o SSP5-8.5, na metade do século são esperadas diminuições de aproximadamente 10 dias chuvosos. Já para o fim do século, projeta-se uma redução ainda maior. No cenário moderado, também haverá diminuição, de maneira menos acentuada e variada entre os anos, mas após 2040 uma menor quantidade de dias chuvosos anualmente é esperada. Curiosamente, em ambos os cenários o número de precipitações acima de 20 mm deve ocorrer com maior frequência, com uma alteração mais significativa para o SSP5-8.5, mais na segunda metade do século, e da ordem de 30–60% em relação ao período histórico. No cenário moderado a alteração a partir do meio do século também é positiva, porém menos acentuada, chegando a ~30% nos anos com valores de pico mais altos no gráfico.

A análise conjunta dos gráficos acima possibilita uma discussão mais profunda sobre as mudanças nas dinâmicas de precipitação. Pode-se perceber que, apesar do número de dias chuvosos diminuir ao decorrer do século, a quantidade de precipitação total anual não deve alterar significativamente do cenário histórico. Esse fato sugere que mudanças na frequência de precipitação estão sendo compensadas por mudanças na magnitude dos eventos chuvosos. Isto é, espera-se que a magnitude das precipitações aumente, mantendo, com isso, a precipitação anual total. Esse fato é evidenciado na investigação do número de dias chuvosos com magnitude maior do que 20 mm (eventos moderados de precipitação). Sendo assim, em ambos os cenários, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, é esperado que eventos de precipitação ocorram com menor frequência dentro do Estado de São Paulo, porém com maior intensidade média, com uma acentuação dessa relação no cenário pessimista.

Para compreender com maior detalhe as alterações projetadas nas dinâmicas de precipitação no estado de São Paulo, foi analisada a distribuição espacial das mudanças

esperadas nos principais índices de precipitação. A Figura 4 apresenta essa distribuição espacial, obtida a partir das projeções dos 19 modelos climáticos que compõem a base de dados CLIMBra. Optou-se por representar o cenário mais pessimista (SSP5-8.5) para o futuro distante (2070–2100), uma vez que esse período evidencia de forma mais expressiva as possíveis alterações climáticas (Figura 3). As diferenças foram calculadas em relação ao período histórico (1980–2013), sendo que reduções projetadas são indicadas em azul e aumentos, em vermelho.

Figura 4 – Distribuição espacial das mudanças na precipitação para o Estado de São Paulo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A distribuição do aumento no índice de precipitação máxima anual é semelhante por todo o território, com um destaque para o oeste e sul do estado que terão os maiores valores de intensificação; entretanto, haverá um acréscimo mais brando no litoral norte. De toda forma, projeta-se um aumento geral da precipitação máxima anual de, pelo menos, 10 mm em todo o estado, confirmando os resultados anteriormente.

Como evidenciado na Figura 3, a precipitação total do estado não deve ter um grande aumento. Com exceção da região sul do estado, na fronteira com o estado do Paraná, espera-se um aumento mais modesto da precipitação total anual, evidenciada por uma coloração mais clara. Na região Sul do estado, o aumento é mais significativo, corroborando com estudos

recentes que sugerem precipitações mais frequentes e intensas no sul do País (BALLARIN et al. 2024).

Em concordância com os padrões médios espaciais apresentados na Figura 3, projeta-se uma diminuição geral no número de dias chuvosos em todo o estado de São Paulo. No entanto, essa tendência não é espacialmente homogênea. Enquanto o sul do estado apresenta um leve aumento na frequência de dias chuvosos — em contraste com o padrão predominante —, observa-se uma redução progressiva dessa frequência em direção ao norte, acompanhada por uma maior variabilidade entre os modelos. Esses resultados, em conjunto com os índices avaliados anteriormente, reforçam as projeções espaciais de mudança na precipitação já sugeridas por estudos recentes (Ballarin et al., 2023; CLIMBra).

Para o número de dias anuais com precipitações acima de 20 mm, projeta-se um aumento em todo o território do estado. De maneira semelhante à distribuição espacial da precipitação total anual, espera-se um aumento mais moderado nas regiões norte e oeste do estado. Através da análise conjunta das Figuras 3 e 4, pode-se inferir que as mudanças climáticas devem alterar os padrões de precipitação no estado. Entretanto, as mudanças devem ocorrer de maneira não homogênea dentro do estado de São Paulo. Em geral, na região Sul, espera-se um aumento na frequência e intensidade dos eventos, contribuindo para a maior ocorrência de eventos extremos e totais anuais, conforme evidenciado por estudos recentes (MEDEIROS, BALLARIN). Entretanto, para as demais regiões do estado, observa-se, em geral, uma diminuição no índice de dias chuvosos, porém aumentos de precipitação total e da recorrência de chuvas com pelo menos 20 mm, evidenciando, portanto, uma mudança diferente esperada para eventos leves e intensos de precipitação. Isto é, para essa parte do estado, projeta-se um cenário de chuvas mais intensas que o restante do território, e uma frequência menor de precipitações.

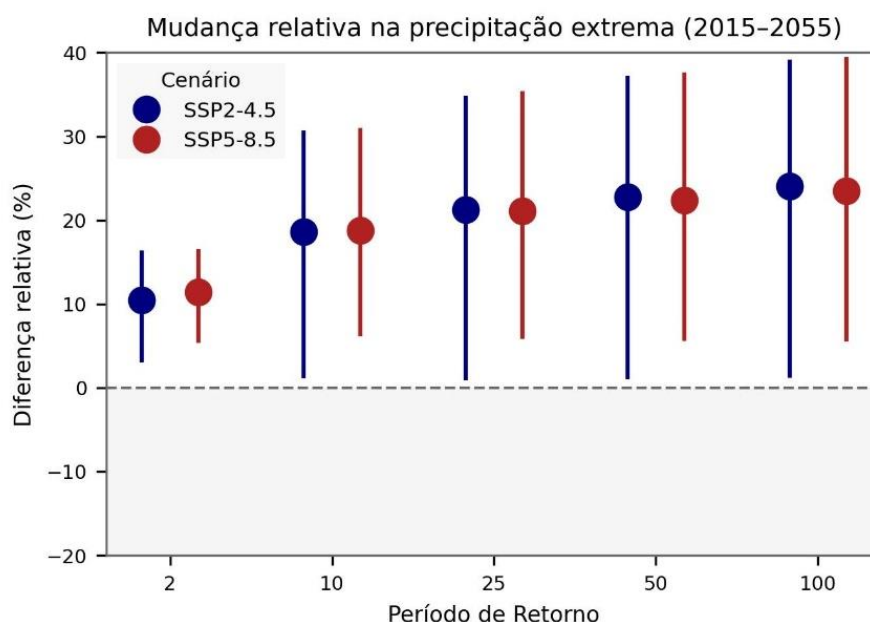
5.2 Impactos das mudanças nas práticas de engenharia em São Carlos

A região central do estado de São Paulo, onde se localiza o município de São Carlos, apresenta projeções de alteração nos índices de precipitação semelhantes às observadas no noroeste do estado, conforme caracterizado anteriormente e evidenciado nas Figuras 3 e 4. Para essa região, espera-se uma intensificação das precipitações, acompanhada de uma redução na frequência de ocorrência dos eventos chuvosos. Com o objetivo de avaliar como essas mudanças podem impactar práticas de engenharia, especialmente no dimensionamento de obras hidráulicas, foi conduzido um estudo de caso voltado à análise das possíveis implicações nas

curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) para o município de São Carlos, examinando de que forma eventos com diferentes períodos de retorno (TR) podem ser afetados.

A Figura 5 e Figura 6, evidenciam como as mudanças no período de retorno em precipitações extremas são esperadas no município, para os anos de 2015 até 2055 e 2055 até 2100, respectivamente, representando, com isso diferentes horizontes de projeto a fim de trazer maiores informações para obras de micro e macrodrenagem, respectivamente. As simulações foram representadas de maneira semelhante em azul e vermelho, para os cenários SSP 2-4.5 (moderado) e SSP 5-8.5 (pessimista), respectivamente.

Figura 5 – Mudança relativa na precipitação extrema de 2015 até 2055.



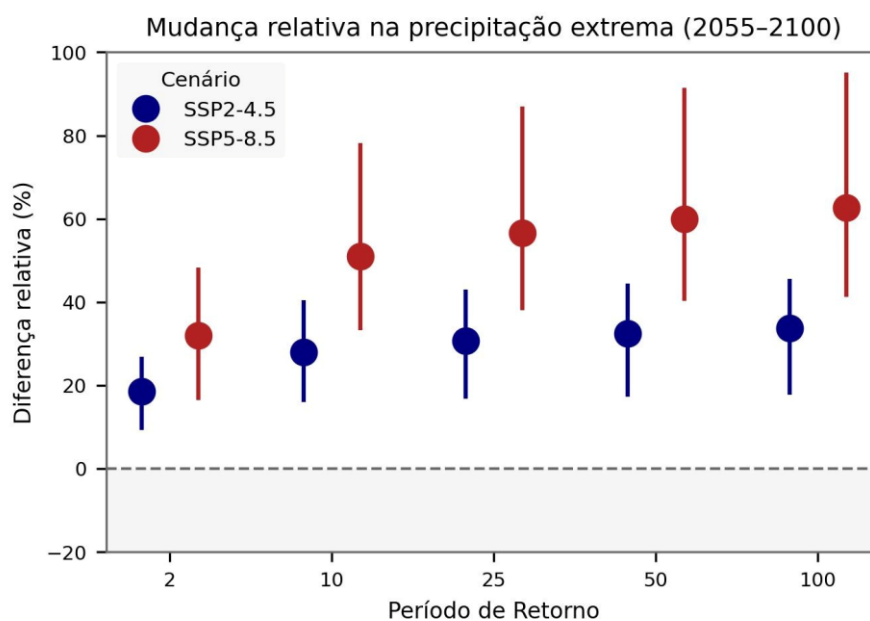
Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 5, os marcadores indicam a variação percentual projetada na intensidade de eventos extremos em função do TR (2, 10, 25, 50 e 100 anos). A linha tracejada em 0% representa ausência de mudança, enquanto as barras verticais expressam a dispersão intermodelos (incerteza) ao redor da estimativa central. Assim, valores acima de 0% indicam intensificação dos picos de chuva para o respectivo TR. Observa-se um padrão coerente com os sinais regionais discutidos anteriormente: as medianas para ambos os cenários são positivas em todos os TR avaliados, sugerindo aumento da intensidade das precipitações extremas já na metade do século. Além disso, há tendência de incrementos maiores conforme o TR aumenta. Isto é, eventos mais raros (25–100 anos) apresentam ganhos médios (mediana multimodelo) da ordem de 20–25% em ambos os cenários. Já os eventos mais frequentes (2–10 anos) apresentam acréscimos de 10–20%. As diferenças entre os cenários são pequenas nessa janela temporal,

indicando que a divergência entre trajetórias de emissões ainda não se expressa de forma marcada até 2055.

No entanto, a amplitude das barras de incerteza cresce com o TR, refletindo maior variabilidade entre modelos justamente nos eventos mais raros. Esse alargamento sugere cautela na interpretação ponto a ponto e reforça a necessidade de análises de sensibilidade ao considerar faixas de projeto. Ainda assim, o sinal predominante de intensificação é consistente com o quadro em que a frequência de dias chuvosos diminui ao longo do século, ao passo que a magnitude dos eventos extremos aumenta (ver Figuras 3 e 4). Esses resultados evidenciam impactos significativos nas práticas de engenharia já na primeira metade do século, especialmente para infraestruturas cujo dimensionamento é associado a períodos de retorno mais elevados, sugerindo a necessidade de atualizações das obras.

Figura 6 – Mudança relativa na precipitação extrema de 2055 até 2100.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura 6 (2055–2100). Mantém-se a codificação visual da figura anterior; nesta janela observa-se um deslocamento das medianas para valores mais altos em todos os períodos de retorno ($TR \approx 2, 10, 25, 50$ e 100 anos) e uma separação mais nítida entre os cenários. A figura explica, portanto, o comportamento esperado para o fim do século, quando as diferenças entre trajetórias de emissões ganham relevância prática.

Observa-se um reforço do sinal de intensificação em relação à metade do século. As medianas permanecem positivas em todos os TR, sem inversões de sinal, e os ganhos crescem de forma aproximadamente monotônica com a raridade do evento (maior TR \rightarrow maior

acréscimo). Em TR baixos (2–10 anos), a mediana aumenta cerca de 15–30% no SSP2-4.5 e 30–55% no SSP5-8.5; para TR altos (25–100 anos), os ganhos típicos são de 28–36% no SSP2-4.5 e 55–65% no SSP5-8.5. Nota-se que a separação entre cenários já é perceptível a partir de TR intermediários (≈ 25 anos) e se acentua para eventos mais raros, conferindo ao SSP5-8.5 incrementos substancialmente maiores.

A incerteza também cresce com o TR: as barras verticais se alongam nos eventos raros e tendem a ser mais amplas no SSP5-8.5, refletindo maior variabilidade entre modelos sob forçamento mais intenso. Ainda assim, o sinal positivo é robusto — os pontos permanecem acima de 0% em todos os TR. Em termos interpretativos, isso indica que, mesmo consideradas as faixas de dispersão, a probabilidade de maior intensidade de extremos prevalece; o que varia é a magnitude desse aumento. Para o planejamento, o recado é claro: a não-estacionariedade precisa ser incorporada nas decisões, especialmente à medida que o horizonte se aproxima do fim do século.

Em síntese, o quadro descrito pela Figura 6 é coerente com a dinâmica regional já discutida: menos ocorrências de chuva ao longo do ano convivendo com eventos mais intensos. No fim do século, esse contraste se amplifica e a escolha de cenário passa a influenciar diretamente as quantidades de projeto, sobretudo em TR elevados.

5.3 Implicações para projeto e gestão da drenagem em São Carlos (2015-2100)

Os resultados para São Carlos indicam não-estacionariedade no regime de precipitações extremas, com intensificação em todos os períodos de retorno (TR) e incerteza crescente nos eventos mais raros. Na metade do século (2015–2055), projeta-se um aumento moderado das intensidades de projeto, em torno de uma a duas dezenas percentuais, com ganhos maiores nos TR elevados e sobreposição entre os cenários. Para o fim do século (2055–2100), o sinal se acentua e os cenários divergem: o SSP2-4.5 aponta incrementos típicos de $\approx +15$ –36%, enquanto o SSP5-8.5 alcança $\approx +30$ –65%, sobretudo para TR de 25–100 anos; as barras de incerteza tornam-se mais amplas nos eventos raros.

Diante desses resultados, as práticas de engenharia no município devem abandonar hipóteses estacionárias e internalizar acréscimos percentuais nas intensidades de projeto. Impõe-se a revisão de curvas IDF e hietogramas com ajustes percentuais diferenciados por horizonte temporal e por TR; o dimensionamento deve ser conduzido por faixas de desempenho coerentes com as incertezas multimodelo, explicitando níveis de serviço, sobretudo para $TR \geq 25$ anos. Recomenda-se priorizar controle na fonte (pavimentos permeáveis, jardins de chuva,

reservatórios de detenção/retardo, telhados verdes) e reavaliar seções de galerias e travessias, volumes de detenção e cotas de extravasores, alinhando-os às faixas de incremento previstas.

No planejamento urbano, devem ser previstas restrições a ocupações em planícies de inundação, cotas mínimas de soleira e corredores de escoamento e infiltração. Na operação, convém fortalecer a manutenção preventiva e os protocolos de alerta e resposta para eventos de curta duração e alta intensidade. Por fim, é necessária revisão periódica, com base em novas rodadas de modelos e observações; e, para infraestrutura crítica de longa vida útil e alto risco de falha (p. ex., barragens, hospitais, adutoras troncais), a referência de projeto deve adotar o cenário mais conservador (SSP5-8.5). Essa combinação de revisão técnica, gestão do risco e ordenamento urbano é condição para manter níveis de serviço aceitáveis diante do aumento projetado da severidade dos extremos ao longo do século em São Carlos.

6 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos, este estudo caracterizou as alterações futuras da precipitação no Estado de São Paulo a partir do ensemble CLIMBra e, em seguida, traduziu essas mudanças para as práticas de engenharia por meio de um experimento local em São Carlos, com enfoque na estimativa e comparação de Curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) entre períodos histórico e futuro. Essa estratégia permitiu articular o diagnóstico hidroclimático regional com implicações diretas de projeto, mantendo coerência metodológica e aderência ao problema de engenharia investigado.

Do ponto de vista regional, os resultados indicam um padrão não homogêneo de mudanças: no interior paulista (norte e oeste), sinaliza-se redução na frequência de dias chuvosos (R1mm), ao passo que aumentos mais expressivos na intensidade de extremos (Rx1day e R20mm) tendem a se concentrar no sul e em parte do oeste do estado. Esse comportamento, observado na análise temporal e espacial dos índices, é compatível com um cenário de concentração de volumes em menos eventos, reforçando pressões sobre o sistema de drenagem urbana mesmo na ausência de grandes incrementos no total anual (PRCPTOT).

No estudo de caso em São Carlos, a avaliação das curvas IDF quantificou o impacto direto dessa reorganização. Para o futuro próximo (2015–2055), os aumentos na intensidade de projeto são moderados, com ganhos típicos da ordem de ~20–25% para tempos de retorno (TR) elevados; nesta janela, as diferenças entre SSP2-4.5 e SSP5-8.5 permanecem discretas e contidas nas incertezas intermodelo.

Contudo, no futuro distante (2055–2100), o sinal de intensificação se reforça e os cenários divergem. No cenário mais pessimista (SSP5-8.5), os incrementos projetados para eventos de alto TR (25–100 anos) são substanciais, alcançando valores medianos entre 55% e 65%. A principal conclusão deste trabalho é, portanto, a constatação da não-estacionariedade do regime de precipitações extremas, que invalida premissas históricas de projeto e aponta para subdimensionamento caso as mudanças climáticas sejam ignoradas.

Metodologicamente, a utilização do CLIMBra — com 19 projeções CMIP6 corrigidas por viés via QDM, cobrindo 1980–2013 (histórico) e 2015–2100 (futuro) — ofereceu base consistente para o diagnóstico e para a transferência de informação climática às escalas de decisão. A opção por estatísticas robustas (mediana multimodelo), somada à leitura conjunta de

indicadores de extremos, contribuiu para reduzir a influência de idiossincrasias de modelos individuais, sem suprimir a comunicação transparente das incertezas.

Em termos de implicações práticas, os achados reforçam a necessidade de incorporar a não-estacionariedade à atualização das IDFs locais, sobretudo para tempos de retorno elevados e empreendimento com vida útil longa. Recomenda-se que as diretrizes de projeto considerem faixas de intensidades compatíveis com as projeções, associadas a margens de segurança calibradas ao risco setorial e à criticidade da infraestrutura (adotando o SSP5-8.5 como referência prudencial), bem como procedimentos de revisão periódica.

Por fim, aponta-se como agenda de continuidade a avaliação de sensibilidade das IDFs a diferentes critérios de seleção/ponderação de modelos e a integração a modelos chuva-vazão representativos das bacias urbanas de São Carlos. A inclusão de variáveis complementares (por exemplo, cenários de uso e ocupação do solo) pode refinar o diagnóstico de risco e apoiar soluções baseadas na natureza e medidas estruturais de controle a montante, consolidando um arcabouço de projeto alinhado às mudanças climáticas e às especificidades territoriais do município.

REFERÊNCIAS

- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; MEIRA NETO, A. A.; ROY, T.; TROCH, P. CABra: a novel large-sample dataset for Brazilian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, n. 6, p. 3105–3135, 2021. DOI: 10.5194/hess-25-3105-2021.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico, v. 41, p. 169–263, 1964.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática. ESALQ/USP, Piracicaba, 2010.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Progress in Physical Geography*, v. 27, p. 205–240, 2003.
- BALLARIN, A. S. et al. The impact of an open water balance assumption on the understanding of the factors controlling the long-term streamflow components. *Water Resources Research*, v. 58, e2022WR032413, 2022.
- BALLARIN, A. S. et al. Brazilian water security threatened by climate change and human water use. *Water Resources Research*, v. 59, n. 11, 2023.
- BALLARIN, A. S. Tema 4 – Modelos e mudanças climáticas (Estudos – Prova escrita e didática). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.
- BALLARIN, A. S.; WENDLAND, E.; ZAERPOUR, M.; HATAMI, S.; MEIRA NETO, A. A.; PAPALEXIOU, S. M. Frequency rather than intensity drives projected changes of rainfall events in Brazil. *Earth’s Future*, v. 12, e2023EF004053, 2024.
- BARBOSA (2009) - BARBOSA, Ricardo Victor Rodrigues. Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio climático de verão. 2009. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- BARBASSA, A. P. Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial da cidade de São Carlos – SP. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – EESC/USP, São Carlos, 1991.
- BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Interannual variability and predictability of rain over the Tropics. *Climate Dynamics*, v. 33, p. 893–916, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas (1961–1990). Brasília: DNMET, 1992.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Aquecimento global e mudanças climáticas. Brasília: MMA, 2018.

BRASIL. Normais Climatológicas 1961–1990. Brasília: Ministério da Agricultura e Reforma Agrária/INMET, 1992.

BURSZTYN, M.; RODRIGUES FILHO, S.; SAITO, H. O clima em transe: vulnerabilidade e adaptação da agricultura familiar. Rio de Janeiro: Garamond, 2016.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, n. 4, p. 88–108, 2004.

CAVALCANTI, D. O.; SILVA, D. F.; REIS, L. F. R. Análises preliminares de dados de monitoramento das bacias urbanas do município de São Carlos – SP. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015. Anais... 8 p.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Drenagem Urbana: manual de projeto. São Paulo, 1979. 476 p.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013.

COLLISCHONN, W.; BRÊDA, J. P. L. F.; WONGCHUIG, S.; RUHOFF, A.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M.; MACHADO FILHO, R. C. de C.; RAMALHO, N. Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 29, e50, 2024. DOI: 10.1590/2318-0331.292420240088.

DONAT, M. G. et al. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, n. 5, p. 2098–2118, 2013.

DUNN, R. J. H. et al. Development of an Updated Global Land In Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 125, n. 16, p. 1–28, 2020.

EHRET, U.; ZEHE, E.; WULFMEYER, V.; LIEBERT, J. HESS Opinions “Should we apply bias correction to global and regional climate model data?” p. 3391–3404, 2012.

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 1937–1958, 2016.

EYRING, V. et al. ESMValTool (v1.0)—A community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth system models in CMIP. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 1747–1802, 2016.

EYRING, V. et al. Earth System Model Evaluation Tool (ESMValTool) v2.0 – An extended set of large-scale diagnostics for quasi-operational and comprehensive evaluation of Earth system models in CMIP. *Geoscientific Model Development*, v. 13, n. 7, p. 3383–3438, 2020.

FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. *Science*, v. 309, p. 570–574, 2005.

FLATO, G. et al. Evaluation of climate models. In: *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, v. 9781107057, p. 741–866, 2013.

GESUALDO, G. C. et al. Unveiling water security in Brazil: Current challenges and future perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, v. 66, n. 5, p. 759–768, 2021.

GLECKLER, P. J.; TAYLOR, K. E.; DOUTRIAUX, C. Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, v. 113, n. 6, p. 1–20, 2008.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. São Carlos. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-carlos.html> Acesso em: 10.09.2025.

IPCC. Emissions Scenarios. N. Nakicenovic; R. Swart (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 570 p.

IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2007.

IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: [s. n.], 2014.

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; New York: Cambridge University Press, 2021.

IPCC. 2013. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Summary for Policy Makers. Switzerland, 2013.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [s. l.], 2022c. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: 21 Set. 2025.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 101, n. 1, p. 121-135, 2010.

LORENZ, R.; HERGER, N.; KNUTTI, R.; SEDLÁČEK, J.; EYRING, V.; FISCHER, E. M. Prospects and Caveats of Weighting Climate Models for Summer Maximum Temperature Projections Over North America. 2018.8.

MALHI, Y.; WRIGHT, J.; NIN, J. Tropical forests and climate change. *Nature*, v. 430, p. 169-173, 2004.

MARAUN, D. et al. Precipitation Downscaling under Climate Change: Recent Developments to Bridge the Gap between Dynamical Models and the End User. *Reviews of Geophysics*, v. 48, p. 1–38, 2010.

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

MATTOS, T. S. et al. Uneven shifts in flood and drought flows in a Brazilian drinking water catchment under climate change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 54, 2025.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.; AVILA-DIAZ, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather Clim. Extrem.*, v. 38, 100511, 2022. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100511

MENDES, P. C. Avaliação quali-quantitativa dos condicionantes de enchentes na bacia do Gregório, São Carlos (SP). Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – EESC/USP, 2005.

MONTEIRO, C. A. F. A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia, USP, 1973.

NEVES, F. T. São Carlos: memória e cidade. São Carlos: EdUFSCAR, 2007.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *J. Water Resour. Prot.*, v. 8, n. 2, p. 252–262, 2016.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 108, p. 1–24, 1982.

O'NEILL, B. C. et al. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, v. 122, p. 387–400, 2014.
doi:10.1007/s10584-013-0905-2..

PARDING, K. M.; DOBLER, A.; MCSWEENEY, C. F.; LANDGREN, O. A.; BENESTAD, R.; ERLANDSEN, H. B.; MEZGHANI, A.; GREGOW, H.; RÄTY, O.; VIKTOR, E.; EL ZOHBI, J.; CHRISTENSEN, O. B.; LOUKOS, H. GCMeval – An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles. *Climate Services*, v. 18, n. March, p. 100167, 2020.

PBMC. Sumário Executivo do Primeiro Relatório de Avaliação Nacional. Rio de Janeiro: Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2014.

PETIT, J. R. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, v. 399, p. 429-436, 1999.

PETRY, I.; MIRANDA, P. T.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; FAGUNDES, H. O.; ARAUJO, A. A.; SOUZA, S. Changes in Flood Magnitude and Frequency Projected for Vulnerable Regions and Major Wetlands of South America. *Geophysical Research Letters*, v. 52, e2024GL112436, 2025. DOI: 10.1029/2024GL112436.

PMSC – PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Dados da Cidade (informações geográficas e administrativas). São Carlos: PMSC, 2018.

RAO, V. B.; ANDRADE, K. M.; FRANCHITO, S. H.; SANTOS, A. F. Variations of rainfall characteristics in Brazil for the period 1961–2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016.

RAO, V. B. et al. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979–2011. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 1, p. 291–302, 2016.

REBELATTO, L. C. Assoreamento do Córrego do Gregório na cidade de São Carlos – SP: uma tentativa de recuperação e os porquês da sua falência. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – EESC/USP, 1991.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185–204, jun. 2010.

RIAH, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153–168, 2017. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo – Escala 1:500.000. São Paulo: FFLCH/USP; IPT; FAPESP, 1997.

SANDERSON, B. M.; KNUTTI, R.; CALDWELL, P. Addressing interdependency in a multimodel ensemble by interpolation of model properties. *Journal of Climate*, v. 28, n. 13, p. 5150–5170, 2015.

SAMPAIO, G. et al. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L17709, 2007.

SANCHES, R. G. Análise das chuvas diárias na região de São Carlos/SP por meio de índices climáticos e das tendências pluviométricas. 2019. 201 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SILVA DIAS, M. A. F. et al. Changing precipitation extremes in São Paulo State, Brazil. 2013.

SILVA DIAS, M. A. F. et al. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, v. 116, n. 3, p. 705–722, 2013.

SHRESTHA, D. L.; ACHARYA, S. C.; SHRESTHA, S. Bias correction of climate models for hydrological modelling—are we doing it right? *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4365–4374, 2017. doi:10.1002/joc.5098.

SHRESTHA, A.; RAHAMAN, M. M.; KALRA, A.; JOGINEEDI, R.; MAHESHWARI, P. Climatological drought forecasting using bias corrected CMIP6 climate data: a case study for India. *Forecasting*, v. 2, n. 2, p. 59–84, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/forecast2020004>

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves Under Climate Change. *Water Resources Management*, v. 28, p. 2539–2562, 2014.

SUGAHARA, S.; ROCHA, R. P.; SILVEIRA, R. Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in São Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 9, p. 1339–1349, 2009.

TEBALDI, C.; KNUTTI, R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, n. 1857, p. 2053–2075, 2007.

TEBALDI, C.; DEBEIRE, K.; EYRING, V.; FISCHER, E.; FYFE, J.; FRIEDLINGSTEIN, P.; KNUTTI, R.; LOWE, J.; NEILL, B. O.; SANDERSON, B. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. n. Cmcc, p. 253–293, 2021.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007.

UNESCO. World Water Development Report. Paris: UNESCO, 2003.

ZHANG, X. et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 2, n. 6, p. 851–870, 2011.