

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS REGIONALIZADAS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, NO PERÍODO 2020 - 2050

Gustavo ARMANI

Nádia Gilma Beserra de LIMA

Maria Fernanda Pelizzon GARCIA

Jussara de Lima CARVALHO

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar as projeções climáticas do período 2020-2050 para diversas variáveis climáticas no Estado de São Paulo, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Essas projeções foram elaboradas a partir de quatro modelos climáticos (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM) com regionalização de 20 km, aprimorada pelo modelo Regional Eta do CPTEC/INPE. Selecionou-se nove variáveis relacionadas à temperatura do ar e chuva, e calculou-se o desvio entre o período observado (1961-1990) e o projetado (2020-2050) para os dois cenários RCPs 4.5 e RCP 8.5, para cada modelo e variável. Em seguida, foram selecionados os maiores e menores valores dos desvios, que representam o máximo e o mínimo desvios projetados para cada célula. Com isso, obteve-se o maior intervalo entre as tendências possíveis dos quatro modelos comparados para cada variável analisada no estado de São Paulo. Os resultados indicam que do ponto de vista da temperatura do ar, os modelos utilizados para os dois cenários RCP apontam para o aquecimento da atmosfera, que tende a ser menos intenso na fachada litorânea, devido ao controle exercido pelo oceano, e maior no trecho noroeste do estado, mais distante do Atlântico. Projeta-se redução na duração de ondas de frio (CSDI) e de aumento na duração das ondas de calor (WSDI), sendo que essas tendências aumentam de sul para norte do estado. Para a precipitação não há consenso entre as tendências dos modelos empregados no estudo, com projeções tanto de aumento quanto de redução nos totais anuais e índices extremos relacionados. Entre as diferentes tendências projetadas, a redução na precipitação é o pior cenário a ser enfrentado, dado o caráter essencial à vida que a água se reveste. Os indicadores relacionados à precipitação intensa (R95p e RX5day) evidenciaram uma grande amplitude entre os valores máximos e mínimos projetados nos cenários analisados, sendo que o aumento desses indicadores merece especial atenção, visto que o incremento de precipitações intensas são potenciais deflagradores de desastres, como escorregamentos, inundações e erosão acelerada. Os resultados, dada a sua relevância, foram aplicados no Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do estado de São Paulo, instrumento técnico e político de planejamento que estabelece diretrizes de ordenamento e de gestão do território, considerando as características ambientais e a dinâmica socioeconômica de diferentes regiões do estado.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Temperatura do ar; Precipitação; Eventos extremos; Projeções climáticas.

ABSTRACT

REGIONAL CLIMATE PROJECTIONS FOR THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL, IN THE 2020 – 2050 PERIOD. The objective of this article is to present climate projections for the 2020–2050 period for several climate variables for the State of São Paulo, considering two scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. These projections were based on four climate models (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2, and BESM) with

downscaling of 20 km improved by the CPTEC/INPE Eta Regional Climate Model. Nine variables related to air temperature and rainfall were selected, and the deviation between the observed period (1961–1990) and the projected period (2020–2050) was calculated for the two RCP scenarios for each model and selected variable. Then, the highest and lowest values of the deviations were selected, which represent the maximum and minimum deviations projected for each cell. With this, we obtained the widest range between the possible trends of the four models compared for each variable analyzed in the state of São Paulo. The models used for the two RCP scenarios show the warming of the atmosphere, which tends to be less intense on the shoreline due to the control exerted by the ocean, and greater in the northwest region of the state, furthest from the Atlantic. A reduction in the Cold Spell Duration Index (CSDI) and an increase in the Warm Spell Duration Index (WSDI) is projected, with these trends increasing from south to north of the state. Considering the precipitation, no consensus between the trends of the models used in this study was found, with projections of both increase and decrease in annual total variables and in related extreme indices. Among the different projected trends, the reduction in precipitation is the worst scenario to be faced, given the essential aspect of water. The indicators related to intense precipitation (R95p and RX5day) showed a wide range between the maximum and minimum values projected in the analyzed scenarios, and the increase of these indicators deserves particular attention, since the increase in intense precipitation is a potential trigger of disasters, such as landslides, floods, and accelerated erosion. The results, given their relevance, were applied to the Ecological-Economic Zoning (ZEE) of the State of São Paulo, a technical and political planning instrument that establishes guidelines for land use and management, considering the environmental characteristics and socioeconomic dynamics of different regions of the state.

Keywords: Climate change; Air temperature; Precipitation; Extreme events; Climate projections.

1 INTRODUÇÃO

O clima possui relevância para estudos e políticas ambientais e sociais, pois sua dinâmica é responsável pelos tipos e intensidade de processos geomorfológicos, formação dos solos, evolução e adaptação da biodiversidade, distribuição dos recursos hídricos e energéticos, bem como diversos impactos socioeconômicos. Assim, o conhecimento da dinâmica climática fornece informações importantes sobre o ritmo habitual dos atributos climáticos, que inclui os eventos extremos, e traz elementos para a discussão de formas de uso e ocupação do território, tanto os pretéritos como os atuais, como aquilo que se pretende para as futuras gerações. Trata-se de importante variável a ser considerada no planejamento das atividades humanas.

Se por um lado o clima exerce influência sobre a sociedade, por outro, as ações humanas influenciam o clima. A sociedade, por meio de suas ações, é um agente modificador do ambiente, que

reagindo e inovando, é capaz de criar micro e topoclimas, transformar os climas locais e subregionais, e influenciar indiretamente nos climas regionais, zonais e global (MONTEIRO 1976).

O clima, cuja essência é o ritmo, sempre foi variável em qualquer escala de tempo e espaço. Dentro dessa variabilidade estão os riscos climáticos, que podem gerar diferentes graus de danos ou prejuízos à sociedade. Soluções de novas formas de organização econômica, social e política devem ser encaminhadas para dirimir esses efeitos. A partir desta afirmação, tem-se observado que na maioria dos países em desenvolvimento, principalmente aqueles localizados na zona intertropical, os eventos climáticos de pequeno ou médio desvio em relação ao habitual têm suas consequências ampliadas substancialmente pela estrutura socioeconômica vigente (TARIFA & MELLO 1983).

Estudos reunidos e avaliados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) demonstram um aumento da temperatura

média do ar oriundo da crescente concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera resultante, principalmente, da ação humana, cujo impacto tende a aumentar a variabilidade dos atributos climáticos e produzir desastres (ALEXANDER *et al.* 2005, MEEHL *et al.* 2005, GRIMM & NATORI 2006, VERA *et al.* 2006, BOMBARDI & CARVALHO 2008, VALVERDE & MARENGO 2010, MARENGO *et al.* 2013, OBREGON *et al.* 2014, VIOLA *et al.* 2014, NATIVIDADE *et al.* 2017, MACHADO *et al.* 2021, RIBEIRO NETO *et al.* 2012, ZÁKHIA *et al.* 2021, FERREIRA & VALVERDE 2022, entre outros). A evidência da influência humana no sistema climático era considerada como muito provável, com um grau de confiança maior que 90%, na publicação do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC-AR4 (IPCC 2007). No entanto, no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC-AR5 (IPCC 2014), indicou-se que seria extremamente provável que mais da metade do aumento observado na temperatura média global da superfície nos últimos 70 anos tenha sido causado pelo aumento antropogênico na concentração de gases de efeito estufa.

Por fim, no Sexto Relatório (AR6) concluiu-se que o sistema climático está atingindo, cada vez mais, níveis ainda não registrados em séculos anteriores, mudando a taxas sem precedentes pelo menos nos últimos 2.000 anos, sendo, portanto, inequívoca a influência humana no aquecimento da atmosfera, oceano e continentes desde o período pré-industrial. Destaca-se ainda que o incremento induzido no período 2010-2019 foi de 0,8 °C a 1,3 °C na temperatura média global em relação ao período 1850-1900. As mudanças induzidas pelas forçantes naturais do sistema climático variaram neste período entre -0,1 a +0,1°C (IPCC 2021). Diante desse cenário, a temática de mudanças climáticas se reveste de caráter fundamental para o planejamento de atividades humanas, sejam econômicas, políticas ou sociais, no curto, médio e longo prazos.

O objetivo deste artigo é apresentar as projeções climáticas do período 2020-2050 para diversas variáveis climáticas no Estado de São Paulo, considerando os cenários de emissão RCP 4.5 e 8.5. Essas projeções foram elaboradas a partir de quatro modelos climáticos (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM) com regionalização aprimorada pelo modelo Regional Eta do INPE. A resolução final dos produtos apresentados é de 20 km.

Tais resultados, dada a sua relevância, foram aplicados no Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do estado de São Paulo, instrumento técnico

e político de planejamento que estabelece diretrizes de ordenamento e de gestão do território, considerando as características ambientais e a dinâmica socioeconômica de diferentes regiões do estado. Nesse instrumento, esforços empreendidos na incorporação da temática “Mudança Climática” na articulação entre as diferentes políticas que atuam no território estadual culminaram numa diretriz voltada exclusivamente a essa temática, definida como “Estado resiliente às mudanças climáticas”, visando identificar e reduzir as vulnerabilidades sociais e ambientais, bem como preparar o estado para situações de risco. A exploração econômica do território paulista, bem como do Brasil, foi conduzida historicamente em detrimento das condições geológicas. No contexto atual, em que sempre se busca maior e mais rápido desenvolvimento econômico, a conscientização dos problemas ambientais decorrentes das ações humanas é, por isso, cada vez mais importante.

2 AS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

O estado de São Paulo está situado em sua maior parte na zona intertropical, e uma menor parte na subtropical. É banhado a leste pelo Oceano Atlântico, onde a corrente oceânica do Brasil (quente) é predominante.

O clima do estado de São Paulo está intrinsecamente associado com sua posição no continente Sulamericano. A forma do continente e a superfície oceânica com suas variações térmicas constituem a base dos macrocontroles climáticos. A superfície continental da América do Sul, mais larga no trecho intertropical, com a planície Amazônica ocupando grande parte desse trecho, possibilita a formação do que se convencionou designar “massa Equatorial Continental” (mEC). No centro do continente, a planície Platina, aliada ao aquecimento de verão e à subsidência dinâmica, promove a gênese da “massa Tropical Continental” (mTC). No trecho extratropical o continente se torna ainda mais estreito e não oferece condições para formação de “massa Polar Continental” (mPC). Os anticiclones migratórios polares desenvolvem-se nas latitudes subpolares sobre os oceanos e, a depender de suas trajetórias, podem dar origem às massas polares marítimas ou continentais.

A configuração e morfologia da Cordilheira dos Andes, de orientação Norte-Sul e com altitudes elevadas, praticamente separa a circulação atmosférica dos baixos e médios níveis das vertentes

tes Pacífica e Atlântica, com exceção do extremo sul, onde as altitudes são menores e ela se torna descontínua, permitindo o extravasamento do ar polar de oeste para leste, que promove o acúmulo de ar frio na vertente oriental. A massa polar marítima, gerada no Atlântico à altura do planalto da Patagônia, sobre as águas relativamente frias (Corrente Falklands) encontra maior facilidade ao avanço para latitudes mais baixas porque o corredor interior de planícies e altitudes relativamente baixas do Planalto Brasileiro, dinamizados pela ação da frente polar, possibilitam grandes invasões de ar extratropical sobre a vertente Atlântica do continente. As águas quentes da Corrente do Brasil contribuem para modificações nas propriedades das massas polares, diversificando suas propriedades em função de suas trajetórias, ou pelo litoral, ou pelo interior do continente.

A zona de interação entre os sistemas inter-tropicais e extratropicais foi designada genericamente como frente polar. Na América do Sul, a frente polar Atlântica (FPA), aquela que atua na fachada oriental da América do Sul, apresenta grande mobilidade meridional, com elevado grau de penetração sobre a faixa central e leste do continente sul-americano. A maior frequência de passagens da FPA ocorre entre o rio da Prata e o Trópico de Capricórnio. Desta forma, o território paulista recebe a influência da ação direta das frentes polares justamente porque é área de encontro das correntes tropicais marítimas de E-NE, das correntes polares do sul, e das correntes de O-NO do interior do continente. O estado de São Paulo encontra-se no local de interação entre diferentes sistemas atmosféricos, aliado à presença do limite zonal entre dois climas: aquele do Brasil Meridional, classificado como Subtropical permanentemente úmido, e o do Brasil Central, classificado como Tropical com alternância de períodos seco e úmido bem definidos. Esse limite zonal foi definido por MONTEIRO (1973), conforme pode ser visto na figura 1. Essa classificação climática foi realizada a partir da dinâmica dos sistemas atmosféricos no nível continental para avaliar sua participação genética no território paulista.

A distribuição da pluviosidade no estado de São Paulo reflete, concomitantemente, as grandes feições do relevo paulista, o posicionamento em relação ao litoral ou ao interior e a frequência dos sistemas atmosféricos nos diferentes trechos do estado, sendo que ao sul do limite zonal (Figura 1) a frequência dos sistemas extratropicais é sensivelmente maior que ao norte.

Os sistemas extratropicais, incluindo os sistemas frontais e os anticiclones migratórios polares, atuam no estado por cerca de 50% a 25% do ano, em alternância com o sistema tropical marítimo (de 50% a 25%), responsável pela tendência à estabilização do tempo no estado. Muitas vezes, intercalados entre os extratropicais e o tropical marítimo, atuam os sistemas vindos do interior do continente, vinculados aos ventos de NO e O, dominando por cerca de 10 a 15% de um ano. Estes últimos, associados às frentes polares, respondem pelos aquecimentos pré-frontais, com elevados índices de instabilidade que promovem eventos pluviiais de elevada intensidade.

Dos estados brasileiros, São Paulo é aquele com maior grau de ocupação de seu território, maior contingente populacional e maior desenvolvimento econômico, diretamente associado ao desempenho de sua agricultura, indústria e serviços. Justamente por esses motivos é o trecho do território brasileiro com o maior grau de modificação dos espaços naturais.

O interesse dos “sistemas produtivos” no estado de São Paulo quase eliminou a totalidade da vegetação nativa. Atualmente, o estado apresenta cerca de 22,9% de vegetação florestal nativa (SÃO PAULO 2020), em sua maioria restrita a unidades de conservação.

A população do estado de São Paulo em 2021 foi estimada em 46,6 milhões de pessoas (IBGE 2022), o que representa cerca de 20% da população brasileira. O estado apresenta a maior produção industrial brasileira, tendo o maior Produto Interno Bruto (PIB) dos estados do Brasil, que em 2017 foi de R\$ 2,120 trilhões (SÃO PAULO 2020). Esse resultado econômico provém de uma economia diversificada, sendo o setor terciário (serviços) o principal responsável pela grandiosidade econômica, representando 76,7% do PIB, a indústria (setor secundário) representa aproximadamente 21,2%, e o setor agropecuário (primário), cerca 2% (SÃO PAULO 2020).

A atividade industrial está localizada e concentrada, em sua maioria, nas regiões metropolitanas. Elas representam, do ponto de vista ambiental, elevado grau de modificação dos ecossistemas naturais, mas com menor expressão territorial. Já a agropecuária, ocupa a maior parte do território do estado, principalmente no interior. Apesar de ser o setor que ocupa a maior área do território, ela representa apenas 2% do PIB do estado, sugerindo uma baixa eficiência, pois produz relativamente pouco em extensas áreas (SÃO PAULO 2020).

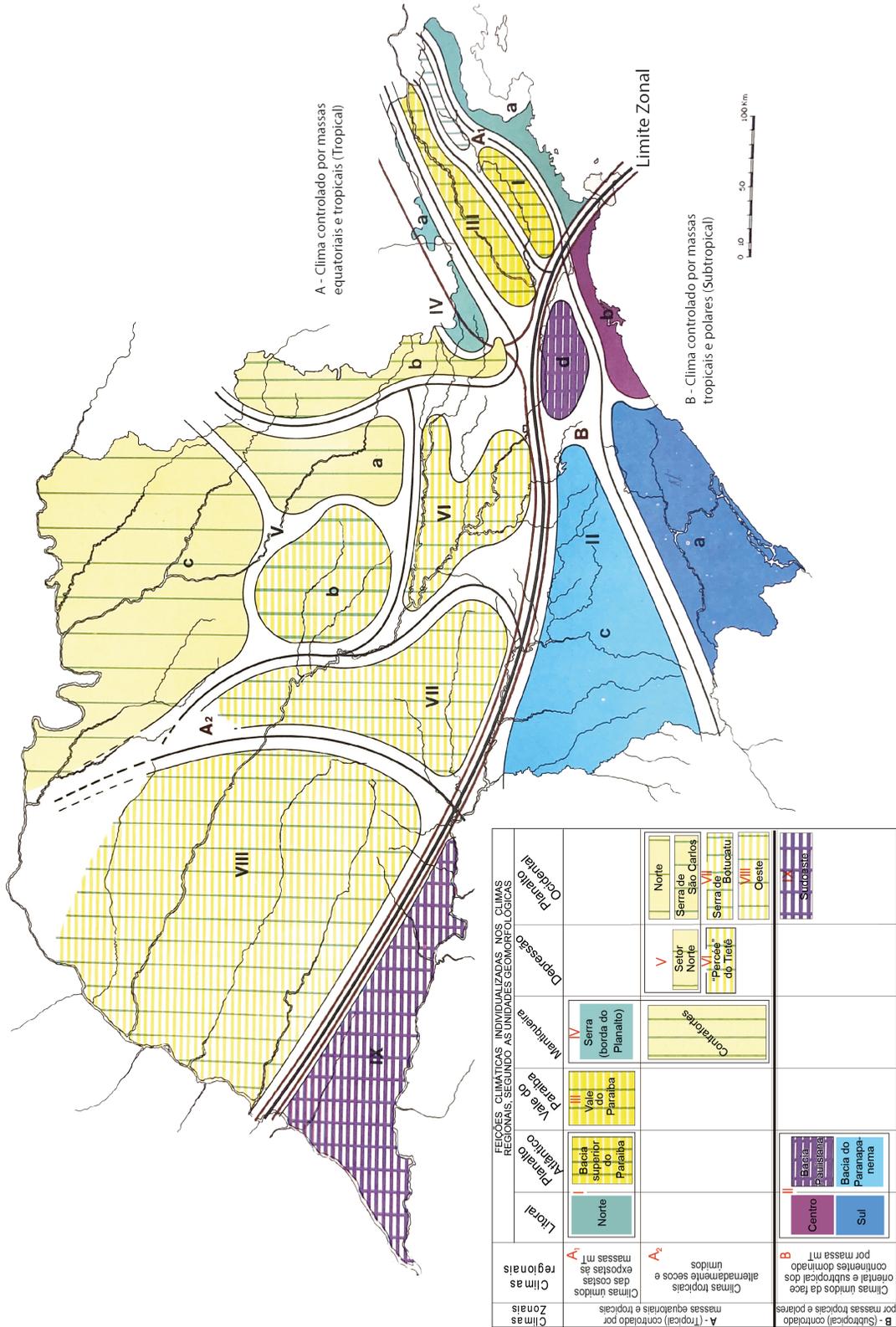


FIGURA 1 – Classificação climática do estado de São Paulo (Fonte: MONTEIRO 1973).

Este fato ainda se reveste de maior importância, pois compete com a conservação de áreas naturais, o que aumenta a vulnerabilidade de vastas áreas do estado às mudanças climáticas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Cenários RCPs - Trajetórias de Concentração Representativa

Os cenários socioeconômicos e de emissão de gases do efeito estufa são usados na pesquisa climática para fornecer descrições plausíveis de como o futuro pode ser definido com relação a um conjunto de variáveis, incluindo mudanças socioeconômicas, tecnológicas, uso de energia, emissões de gases de efeito estufa e poluentes do ar. Eles são usados como variáveis de entrada para alimentar o modelo climático e como base para a avaliação de possíveis impactos climáticos e opções de mitigação e custos associados (VAN VUUREN *et al.* 2011).

Os *Representative Concentration Pathways* (RCPs) ou Trajetórias de Concentração Representativa são cenários que incluem séries temporais de emissões e concentrações de todo o conjunto de gases de efeito estufa (GEE), aerossóis e gases quimicamente ativos, bem como uso e cobertura do solo (MOSS *et al.* 2008). As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, que servem como base aos RCPs, ocorrem principalmente devido ao tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia, padrões de uso do solo, tecnologia e políticas climáticas (IPCC 2014).

A palavra *Representativa* significa que cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam a características específicas de forçante radiativa. O termo *Trajetória* enfatiza que não apenas os níveis de concentração de longo prazo são interessantes, mas também a trajetória levada ao longo do tempo para atingir esse resultado (MOSS *et al.* 2010). Quatro RCPs são apresentados no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) como bases para as previsões e projeções climáticas:

- RCP 2.6: Uma trajetória em que a forçante radiativa atinge o pico de aproximadamente 3 W.m^{-2} antes de 2100 e depois diminui;
- RCP 4.5 e RCP 6.0: Duas vias intermediárias de estabilização, nas quais a for-

çante radiativa seria estabilizada em $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ e $6,0 \text{ W.m}^{-2}$, aproximadamente, após 2100;

- RCP 8.5: Um caminho alto para o qual a forçante radiativa atinge mais de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ até 2100 e continua a aumentar por algum tempo.

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) disponibiliza projeções climáticas para quatro modelos, realizadas nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, e que foram empregadas nesse trabalho.

O RCP 4.5 pressupõe que o sistema terrestre armazenará $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ adicionais, com concentração do CO_2 equivalente da ordem de 600 ppm, apresentando estabilização após o final do século XXI. Este RCP é direcionado para um futuro com redução das emissões relativamente otimista, a partir da implementação de programas consistentes de reflorestamento, diminuição das áreas de cultivos agrícolas e pastagens com o aumento da produtividade e das mudanças dos 12 hábitos alimentares, adoção de políticas climáticas rigorosas, com emissões estáveis de metano e menor consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis (BJØRNÆS 2013).

O RCP 8.5 pressupõe um armazenamento de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ com concentração de CO_2 equivalente superior a 1000 ppm até o final do século. Este RCP implica em um futuro em que não haverá mudanças das atuais políticas públicas para redução das emissões, com aumento das emissões de CO_2 em 2100 três vezes maior do que as atuais, incremento rápido das emissões de metano, expansão de áreas agrícolas e de pastagens para suprir a demanda devido ao crescimento da população mundial, projetada em 12 bilhões em 2100. Este cenário é também baseado em baixa taxa de crescimento tecnológico e alta dependência dos combustíveis fósseis (BJØRNÆS 2013).

Para se ter uma referência, o dado mais atualizado do registro da concentração de CO_2 na atmosfera é realizado pelo Observatório de Mauna Loa no Havaí e registrou uma leitura média diária de aproximadamente 416 ppm, em setembro de 2022 (NOAA 2022).

3.2 Modelos climáticos, dados e representação

Os modelos globais de clima (GCMs) são as melhores ferramentas disponíveis para fornecer informações futuras sobre mudanças cli-

máticas em função de diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa, bem como testar diferentes hipóteses sobre o papel de cada forçante climática. No entanto, a resolução espacial desses modelos varia entre 200 e 100 km. Assim, os modelos climáticos regionais (RCMs) desempenham um papel importante no aumento de escala e geração de dados cada vez mais detalhados (CHOU *et al.* 2014a, b) para que seja possível diagnosticar e avaliar melhor os impactos climáticos em escala local.

Nos últimos anos, houve avanço significativo na tecnologia e arquitetura computacional de integração numérica de modelos, bem como na representação matemática dos processos físicos, químicos e biológicos e suas complexas interações no sistema climático global. Apesar dos avanços científicos e tecnológicos, os resultados dos modelos devem ser usados com cautela em virtude de, pelo menos, três categorias de incertezas: i) aquelas relacionadas aos cenários de emissões; ii) as relacionadas à variabilidade natural do sistema climático; e iii) as inerentes ao próprio modelo em representar os processos físicos e antrópicos (BRASIL 2016a, b, c, d). Apesar das incertezas citadas, as projeções climáticas são informações inovadoras e valiosas, tanto para fins de mitigação de impactos junto à sociedade que habita os diferentes biomas brasileiros, quanto para aperfeiçoar o planejamento de ações de adaptação e minimização dos efeitos das mudanças climáticas (PBMC 2014).

A reduzida resolução espacial dos modelos globais implica a necessidade de métodos de *downscaling* (aumento da resolução espacial) que possam ser aplicados aos cenários da mudança do clima a partir dos modelos globais, a fim de se obter projeções mais detalhadas para determinadas regiões, com uma resolução espacial mais alta do que a fornecida por um modelo global. Isso é de grande utilidade, particularmente para os estudos dos impactos da mudança do clima, na gestão e na operação dos recursos hídricos, nos ecossistemas naturais, nas atividades agrícolas e até mesmo na saúde (BRASIL 2016).

O INPE avaliou, com o modelo climático regional Eta, os diferentes cenários de mudança do clima propostos pelos modelos globais do AR5 do IPCC, os RCPs, e aplicou o método de ampliação dinâmica de escala (*downscaling*) para o Brasil. Esse método consiste na ampliação de escala das projeções de mudanças climáticas

provenientes de modelos climáticos globais para se obter projeções climáticas mais detalhadas, isto é, com maior resolução espacial, e adequada para regiões específicas, como estados, litoral, bacias hidrográficas ou vales, por exemplo. O melhor detalhamento é obtido alimentando modelos atmosféricos regionais com as projeções dos modelos globais climáticos (BRASIL 2016).

As simulações do modelo climático regional Eta, com resolução de 20 km, realizadas pelo INPE, foram avaliadas para o período histórico (1961 a 1990), usando diferentes modelos globais. As simulações reproduziram o clima do período histórico na América do Sul razoavelmente bem. A avaliação das mudanças climáticas futuras indicou uma forte redução da precipitação durante a estação chuvosa na parte central do continente e um aumento da precipitação na parte sul do Brasil até o final do século, com tendências para aumentar os extremos de precipitação no sul e no sudeste do Brasil no futuro (CHOU *et al.* 2014a, b). Mudanças nos extremos climáticos são as principais questões a serem analisadas nos setores vulneráveis e para propor medidas de adaptação (LYRA *et al.* 2017).

As projeções climáticas para o estado de São Paulo foram elaboradas a partir de dados gerados pelo CPTEC/INPE e disponibilizados na Plataforma Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul (PROJETA), regionalizadas pelo modelo Eta (CHOU *et al.* 2014a, b; LYRA *et al.* 2017; BRASIL 2016a, b, c, d), cujo objetivo é disponibilizar dados de cenários climáticos com ampliação de escala (*downscaling*) para melhor estudo de regiões ou áreas de menores dimensões.

Os cenários foram gerados a partir do modelo climático regional Eta, configurado para saída na resolução espacial de 20 km para América do Sul. Essa ampliação de escala foi produzida para os modelos climáticos globais HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM (*Brazilian Earth System Model*). Cabe destacar que esses modelos climáticos globais (MCGs) foram avaliados e selecionados, dentre os mais de 40 modelos climáticos disponibilizados pelo Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), por apresentarem melhor desempenho para simular o clima da América do Sul (CHOU *et al.* 2014a, b; LYRA *et al.* 2017).

Desenvolvido pelo UK Met Office do Reino Unido, o HAdGEM2-ES integra o con-

junto de modelos HadGEM, que é uma coletânea de modelos globais usados a fim de minimizar incertezas e representar e prever retroalimentações complexas no sistema climático (POPE *et al.* 2007). A denominação HadGEM2-ES indica a sua segunda versão (2), que inclui variáveis do Sistema Terrestre (ES - *Earth System*), incluindo além da configuração básica das interações atmosfera-oceano, os processos do ciclo de carbono e química troposférica (MARTIN *et al.* 2011). Esse modelo simula de maneira satisfatória o clima da América do Sul, com tendência a superestimar a temperatura do ar junto à superfície, mas simula melhor os padrões de precipitação, inclusive da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul).

O *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC), desenvolvido pela comunidade científica japonesa, já está em sua quinta versão (MIROC5). Em relação às versões anteriores, a versão 5 apresentou melhores resultados em relação à precipitação, a diversos campos médios zonais, a subsuperfície oceânica equatorial e a simulação do ENSO (*El Niño–Southern Oscillation*). Este modelo inclui em suas rotinas uma versão atualizada do modelo de superfície, denominada *Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and Runoff*, que prediz a temperatura e o volume de água em seis camadas de solo com até 14 m de espessura, uma camada de dossel e três camadas de neve (WATANABE *et al.* 2010).

A segunda geração do Modelo do Sistema Terrestre (CanESM2) é a quarta geração do modelo climático global acoplado, desenvolvido pelo Centro Canadense para Modelagem e Análise Climática (CCCma) do Meio Ambiente e Mudanças Climáticas. O CanESM2 tem como principais componentes do modelo do Sistema Terrestre: (i) modelo de Circulação Geral Atmosférica (AGCM4) em 35 camadas verticais; (ii) Ocean GCM4, desenvolvido a partir do NCAR CSM Ocean Model com resolução horizontal de 256x192 e 40 camadas verticais; (iii) modelo de gelo marinho CanSim1; e (iv) esquema canadense da Superfície Terrestre (CLASSE2.7) e CTEM1 para processos terrestres. Ele acopla um modelo físico atmosfera-oceano (CanCM4) a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e de carbono oceânico (CMOC) (LI & BARKER 2005, VON SALZEN *et al.* 2005).

O BESM, cujo desenvolvimento ocorreu sob a liderança de cientistas brasileiros do

CPTEC/INPE, oferece maior exatidão de processos regionais, inclusive aqueles dependentes de teleconexões, permitindo modelar as mudanças globais e suas consequências regionais. Esse modelo melhora a representação de processos tropicais, normalmente sub-representados em modelos do exterior (NOBRE *et al.* 2013). O BESM, também usado neste trabalho, é constituído pelo modelo de circulação geral atmosférica (AGCM) do CPTEC/INPE acoplado ao modelo oceânico versão 4p1 (MOM4p1) e ao modelo de circulação geral oceânica (OGCM), que inclui o simulador de gelo oceânico, sendo que ambos são oriundos da GFDL (*Geophysical Fluid Dynamics*) (NOBRE *et al.* 2013).

Utilizou-se das simulações dos quatro modelos mencionados para dois cenários de concentrações de gases de efeito estufa, RCP 4.5 e RCP 8.5. Os dados foram obtidos no PROJETA-CPTEC/INPE para os períodos de 1961-1990, considerado como referência do clima atual, e para a média do futuro 2020-2050.

O PROJETA-CPTEC/INPE disponibiliza 33 elementos climáticos e 26 índices de eventos extremos. Para o presente estudo foram selecionados dois elementos climáticos e sete índices de eventos extremos para serem analisados com foco no território do estado de São Paulo, conforme tabela 1.

Primeiramente, calculou-se o desvio absoluto entre o período observado (1961-1990)

TABELA 1 – Elementos climáticos e Índices de eventos extremos selecionados para análise

<i>Variável</i>	<i>Descrição do elemento climático ou índice de evento extremo</i>
TP2m	Temperatura média do ar a 2 m
TNn	Menor temperatura mínima anual (°C)
TXx	Maior temperatura máxima anual (°C)
CSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com T _{min} diária < percentil 10 (dias)
WSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com T _{máx} > percentil 90 (dias).
PRCPTOT	Precipitação total anual
CDD	Número máximo de dias consecutivos sem chuva no ano (dias).
RX5day	Máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (mm).
R95p	Precipitação anual total dos dias em que P > percentil 95 (mm).

Fonte: PROJETA-CPTEC/INPE (2019)

e o projetado (2020-2050) para os dois cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para cada modelo e variável selecionada. Em seguida foram selecionados os valores extremos dos desvios absolutos calculados para cada modelo. Os valores positivos e/ou negativos indicam a tendência de aumento e/ou redução, respectivamente, da variável analisada. Esses valores extremos representam, portanto, o limite superior e inferior da faixa de variação do desvio absoluto obtido para cada variável. Posteriormente, selecionou-se os maiores valores extremos superiores e inferiores, visando obter a maior amplitude de variação entre os modelos, conforme figura 2.

Avaliar projeções climáticas oriundas de quatro modelos diferentes se fez necessário porque a utilização de um único modelo sem correção de vies não é aconselhável, pois cada um apresenta uma tendência específica que depende de como ele foi concebido. Desta forma, o melhor procedimento é avaliar a amplitude de cada variável projetada entre os quatro modelos empregados, sendo possível identificar, por exemplo, uma faixa de variação de temperatura do ar, ou de intensidade de precipitação, abrangendo tanto seu aumento (sinal +), quanto sua redução (sinal -).

Esses valores extremos apresentados devem ser entendidos como críticos para as diferentes atividades humanas, bem como para as diferentes funções de organismos vivos e de processos geodinâmicos.

Os dados apresentados estão disponíveis em formato *shapefile* (.shp) como apêndice deste artigo.

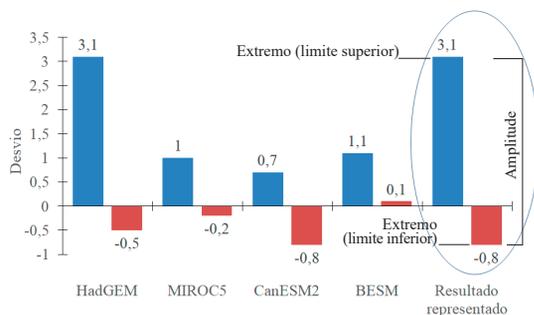


FIGURA 2 – Seleção da amplitude de variação entre os desvios máximos e mínimos obtidos entre a projeção dos modelos climáticos em relação ao período histórico de 1961 a 1990 para uma determinada variável.

A Política Estadual de Recursos Hídricos descentralizou a gestão dos recursos hídricos no estado de São Paulo, adotando as bacias hidrográficas como unidades de gestão e planejamento. As Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) são consideradas como unidades territoriais que permitem o gerenciamento descentralizado dos recursos hídricos e são constituídas por trechos de bacias hidrográficas ou por um conjunto delas (SÃO PAULO 2020). O estado de São Paulo foi dividido em 22 UGRHIs, conforme a tabela 2. Os números das UGRHIs apresentados nessa tabela serão representados nos mapas a seguir para fins de localização e discussão dos resultados.

4 RESULTADOS

Os mapas das figuras 3 a 11 apresentadas a seguir ilustram o intervalo entre o máximo e mínimo desvio obtido considerando o período de 1961 a 1990, visando obter a maior amplitude das variações projetadas pelos modelos, e com isso avaliar a tendência de cada atributo selecionado. Todas as figuras foram projetadas para o período 2020-2050, nos cenários RCP 4.5 (à es-

TABELA 2 – UGRHIs do estado de São Paulo (fonte: SÃO PAULO 2020).

Nº UGRHI	Nome
01	Mantiqueira
02	Paraíba do Sul
03	Litoral Norte
04	Pardo
05	Piracicaba/Capivari/Jundiaí
06	Alto Tietê
07	Baixada Santista
08	Sapucaí/Grande
09	Mogi Guaçu
10	Tietê/Sorocaba
11	Ribeira de Iguape/Litoral Sul
12	Baixo Pardo/Grande
13	Tietê/Jacaré
14	Alto Paranapanema
15	Turvo/Grande
16	Tietê/Batalha
17	Médio Paranapanema
18	São José dos Dourados
19	Baixo Tietê
20	Aguapeí
21	Peixe
22	Pontal do Paranapanema

querda) e RCP 8.5 (à direita). Os mapas “A” e “C” de cada figura representam os desvios máximo e mínimo, respectivamente, obtidos para o cenário 4.5, enquanto “B” e “D” representam os desvios máximo e mínimo, respectivamente, para o cenário RCP 8.5.

Os resultados obtidos para o Estado de São Paulo a partir das avaliações das projeções climáticas oriundas dos quatro modelos aplicados, referem-se à temperatura do ar e à precipitação e respectivos índices extremos, projetadas para o período 2020-2050 (Tabela 1).

4.1 Temperatura do ar

A diferença da temperatura média anual do ar (TP2m) entre a projeção no período 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo é apresentada na figura 3. As figuras 3A a 3D devem ser analisadas considerando que elas ilustram o intervalo entre o máximo e mínimo desvio obtido e representam, portanto, o desvio máximo e mínimo, respectivamente, obtidos para o cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

O desvio entre os dois períodos para a temperatura média anual apresenta sinal positivo (aquecimento) nos dois cenários em toda sua amplitude, considerando os limites superior e inferior. Observa-se que no RCP 4.5 o intervalo de variação do desvio da temperatura do ar, entre o máximo (Figura 3A) e o mínimo (Figura 3C) projetado está entre 0,5 °C a 2,5 °C. As mudanças mais severas foram obtidas no cenário RCP 8.5, com o limite inferior partindo de 0,5 °C (Figura 3D) até o máximo de 3,0 °C (Figura 3B) em relação à temperatura média anual do período 1961-1990. De maneira geral, o aquecimento projetado ocorre em todo estado, mas a dimensão espacial da tendência de aumento difere nos dois cenários analisados, sendo que no RCP 8.5 a metade norte do estado apresenta projeção de aumento entre 2,5 °C e 3,0 °C em relação à média 1961-1990. Essa intensidade de aquecimento só não ocorre na faixa leste e sul do estado.

A distribuição espacial das mudanças projetadas para a temperatura média anual do ar revela uma variação latitudinal, com diminuição em direção a sul do estado e proximidade com o oceano, com aumento do desvio da temperatura do ar quanto mais distante do oceano. Os trechos central e mais ao norte do estado, mesmo considerando os limites inferiores das proje-

ções, apresentam valores mais elevados em relação ao restante do estado.

O desvio da menor temperatura mínima anual do ar (TNn) entre a projeção futura (2020-2050) e o período histórico (1961-1990) para o estado de São Paulo é expresso pela figura 4.

Assim como para a temperatura média anual, a figura 4 evidencia que os desvios das menores temperaturas mínimas anuais apresentam tendência de aumento, de 0,5 °C até 3,5 °C para todos os cenários avaliados, sendo que o aumento mais elevado está restrito ao nordeste do estado de São Paulo (Jales e entorno). No cenário RCP 8.5 percebe-se uma maior área abrangente com aumento entre 1,5 °C a 2,5 °C, ocupando parte do centro-oeste e sudoeste do estado.

A variação espacial desse elemento é similar àquela observada para a temperatura média anual, sendo que a distância do oceano aparenta oferecer maior influência sobre esse elemento climático no limite superior dos dois cenários de emissões avaliados, com os menores desvios mais próximos ao litoral, aumentando conforme se distancia do oceano. Os maiores desvios ocorrem no noroeste paulista, com 3 °C acima da média de 1961-1990 (Figura 4A e 4B).

Em relação aos limites inferiores, a magnitude dos desvios em ambos os cenários é menor, atingindo um máximo de 1,5 °C no RCP 8.5 (Figura 4C e 4D), em áreas relativamente restritas (baixo Ribeira de Iguape, Serra da Mantiqueira e trechos do setor norte da Depressão Periférica). Neste caso, a proximidade do oceano parece não influenciar de forma marcante, pois tanto junto ao litoral, como no trecho oeste do estado, ocorrem os menores desvios. Por outro lado, num cenário de emissões de gases estufa mais otimista (RCP 4.5/Figura 4C) trechos elevados da Serra da Mantiqueira apresentam os menores desvios, enquanto no cenário pessimista (Figura 4D) a situação se inverte, permitindo interpretar que o papel do relevo pode ser diferenciado a depender da concentração de gases estufa.

Com relação à temperatura máxima anual (TXx), os desvios entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 (Figura 5) revelam, assim como para as variáveis anteriores, somente tendência de aumento da temperatura.

De forma geral, o aquecimento neste atributo é mais generalizado em todo estado, sendo que a faixa leste, junto à linha de costa, apresen-

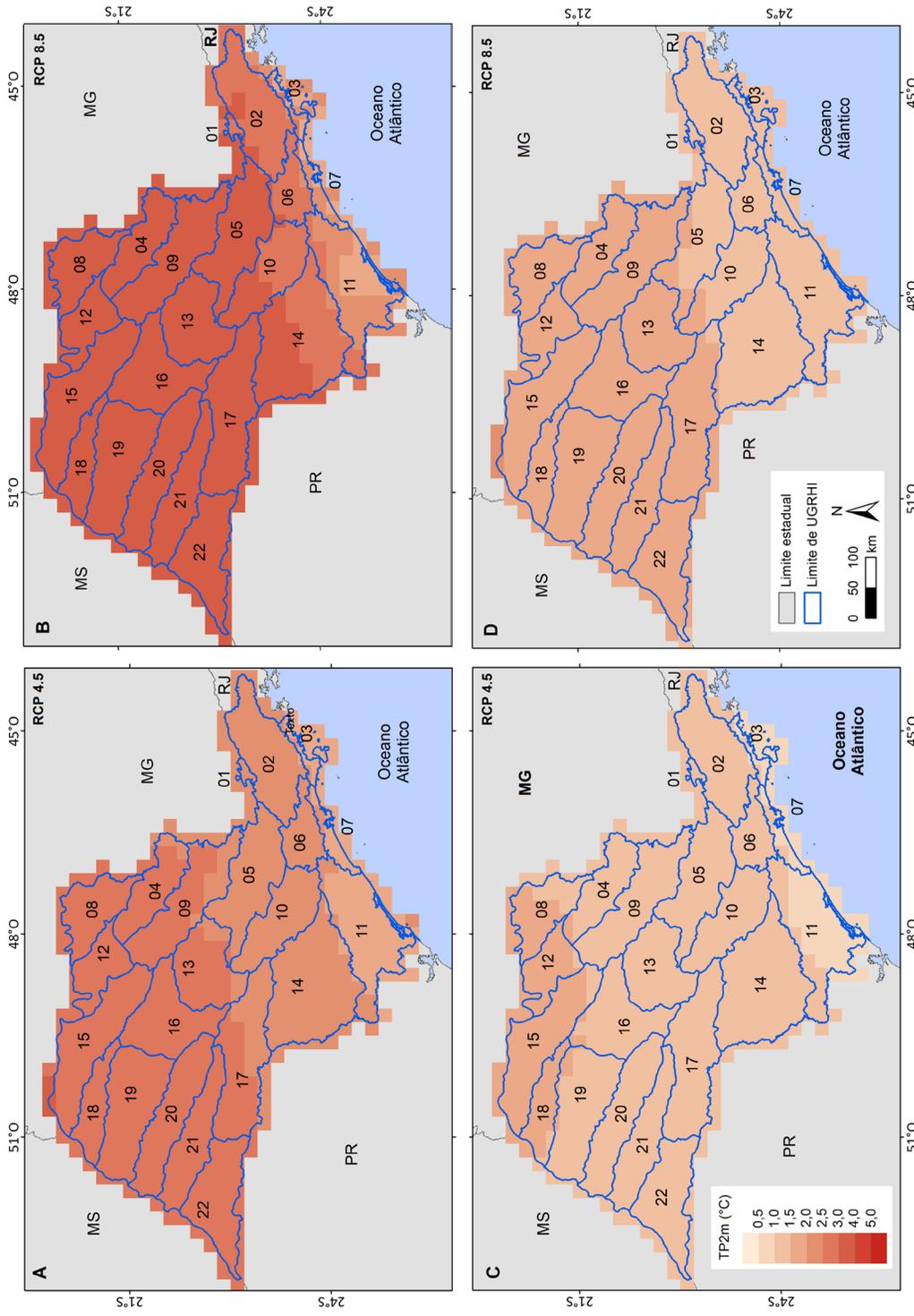


FIGURA 3 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) da Temperatura média anual do ar – TP2m (°C) entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022)

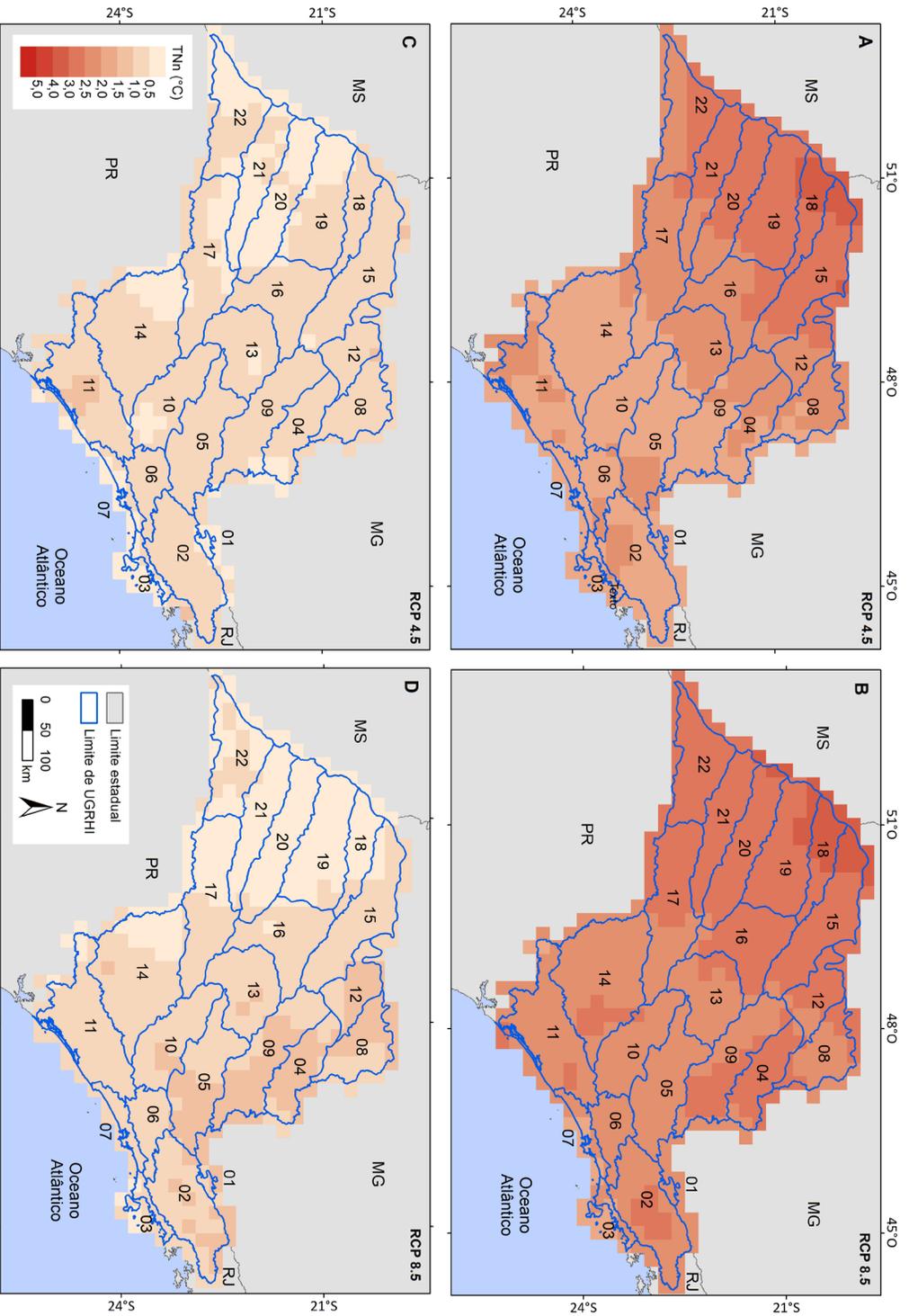


FIGURA 4 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) da menor temperatura mínima anual – TNn (°C), entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022)

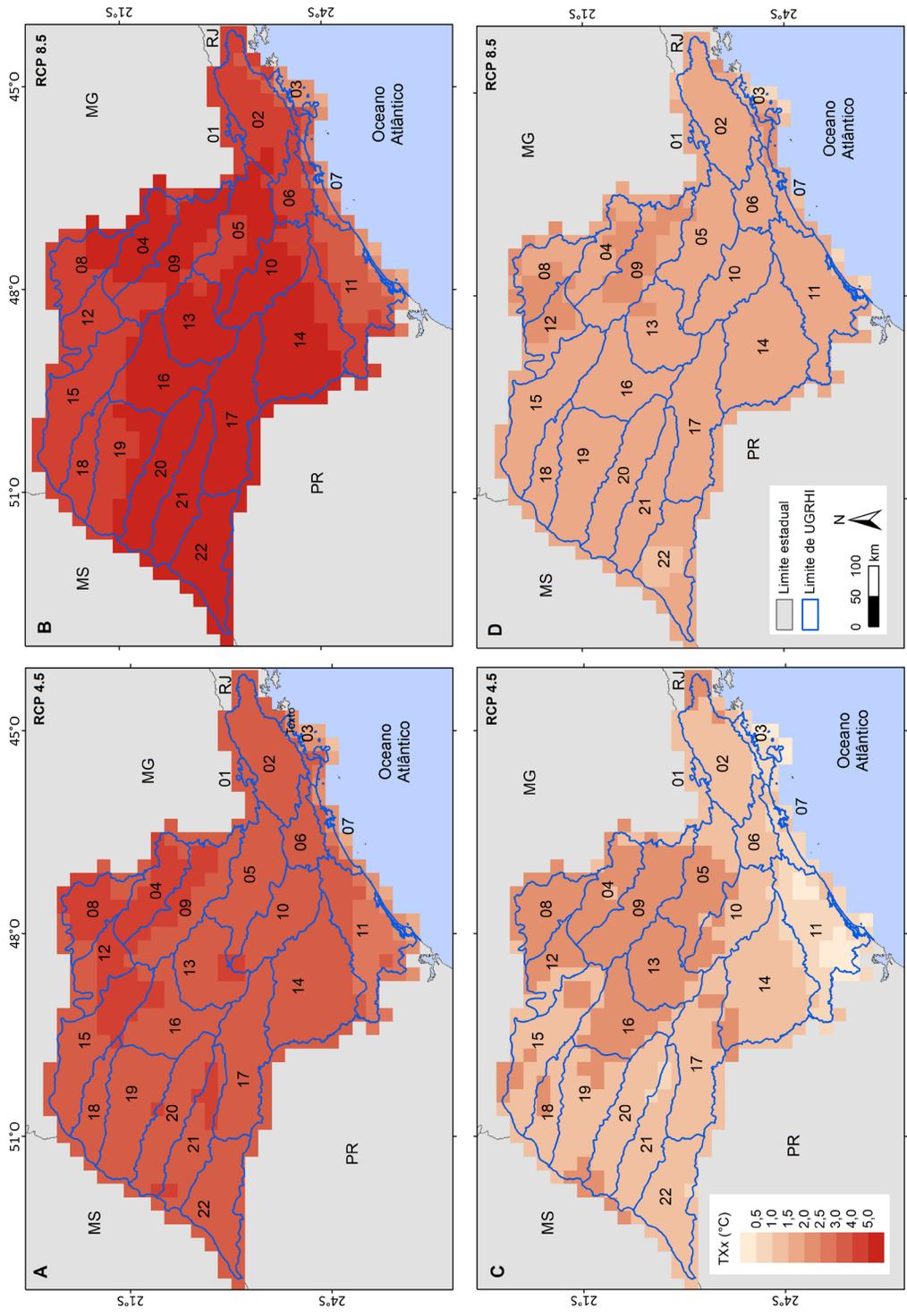


FIGURA 5 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) da maior temperatura máxima anual – TXx (°C) entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022)

ta os menores valores de aquecimento, com os limites inferiores entre 0,5 e 1,5 °C nas UGRHIs litorâneas (03 - Litoral Norte, 07 - Baixada Santista e 11 - Ribeira de Iguape/Litoral Sul), enquanto os máximos partem de 3,0 a 4,0 °C acima da normal 1961-1990 (RCP 4.5), até 6,0 °C no limite superior do cenário RCP 8.5 (Figura 5B). O maior aquecimento do estado não está projetado para o trecho mais ao norte do estado, e sim na faixa central (Figura 5B, cenário RCP 8,5). Considerando os limites inferiores de ambos os cenários e no limite superior do cenário RCP 4.5, o centro e norte aparecem com maior aquecimento (Figura 5A, 5C, e 5D).

Há destaque para a redução do número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura mínima menor que percentil 10 (CSDI) em todos os cenários projetados (Figura 6).

Observa-se nas figuras 6C (RCP 4.5) e 6D (RCP 8.5) pequenas diferenças entre um cenário e outro, mas há tendência de redução de sul para norte do estado neste índice, principalmente no trecho tropical (ver limite dos climas zonais na figura 1) nos dois casos. Para o cenário RCP 4.5, limite superior (Figura 6A), ao longo do médio e baixo curso do rio Tietê, estão projetados pequenos trechos de aumento do CSDI de até 1,5 dias, sugerindo um certo resfriamento dessas pequenas áreas em determinados períodos do ano. No cenário RCP 8.5, limite superior, o estado praticamente inteiro apresenta redução de ondas de frio entre 1 e 3 dias, com pequenos trechos isolados onde essa redução é de até um dia.

Também foi possível verificar que há aumento significativo do indicador de duração de ondas de calor no estado de São Paulo, ao considerar o número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura máxima maior que o percentil 90 – WSDI (Figura 7), presente nos dois cenários projetados e em seus limites superiores (Figura 7A e 7B) e inferiores (Figura 7C e 7D).

No cenário mais pessimista (Figura 7B) esse aumento é superior a 150 dias no norte do estado, e no melhor cenário (Figura 7C), o menor aumento projetado é de 25 dias no sul do estado.

O aumento na duração desse índice é principalmente influenciado pela latitude, sendo que as projeções são inversamente proporcionais a ela, ou seja, quanto menor a latitude, maior a duração de ondas de calor projetadas, e vice-versa. A proximidade com o oceano também influen-

cia nessas projeções, pois o litoral é onde o aumento é menos intenso para os dois cenários e limites superior e inferior.

4.2 Precipitação

Diferente da temperatura do ar, a precipitação apresenta maior dispersão dos dados em todo o estado a depender do cenário projetado, sendo possível observar regiões com aumento e outras com redução em relação ao período 1961-1990. Mas em todos os cenários verifica-se que há predominância espacial no âmbito do estado de tendência de redução na precipitação (PRPCTOT) (Figura 8). O estado todo apresenta redução da precipitação total anual no limite inferior de ambos os cenários (Figura 8C e 8D), mas no norte e noroeste do estado a tendência de redução ocorre em ambos limites e cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5). O aumento de precipitação total anual também é projetado em ambos os cenários, mas somente no limite superior (Figura 8A e 8B) e restrito às UGRHI litorâneas (UGRHI 03 - Litoral Norte, 07 - Baixada Santista e 11 - Ribeira de Iguape/Litoral Sul), que apresentam valores superiores a 700 mm em relação à média anual de 1961-1990; na Serra da Mantiqueira e Serrania de Lindóia, aumento de até 250 mm no total anual, bem como no sul e sudoeste do estado, que estão classificados no clima subtropical, conforme apresentado na figura 1.

O índice de evento extremo, que apresenta o número máximo de dias consecutivos sem chuva no ano (CDD), reflete, de certa forma, a duração de períodos de estiagem no estado (Figura 9). Para o limite superior para os dois cenários considerados estão projetados apenas aumento na duração de dias consecutivos sem chuva, sendo que no caso mais extremo (Figura 9B) há um aumento no período de estiagem na maior parte do estado entre 5 e 10 dias consecutivos, com pequenos trechos no litoral e norte do estado, em que esse período aumentará de 10 a 15 dias. Já em relação ao limite inferior (Figura 9C), o cenário RCP 4.5 apresenta redução no período de estiagem de até 5 dias em uma grande área do norte e oeste do estado, e em alguns pequenos trechos a leste. Nesse mesmo limite inferior, mas num cenário de maiores emissões (RCP 8.5), projeta-se um aumento em praticamente todo o estado de até 5 dias para este índice, com pequenos trechos isolados de redução no norte, noroeste e oeste do estado.

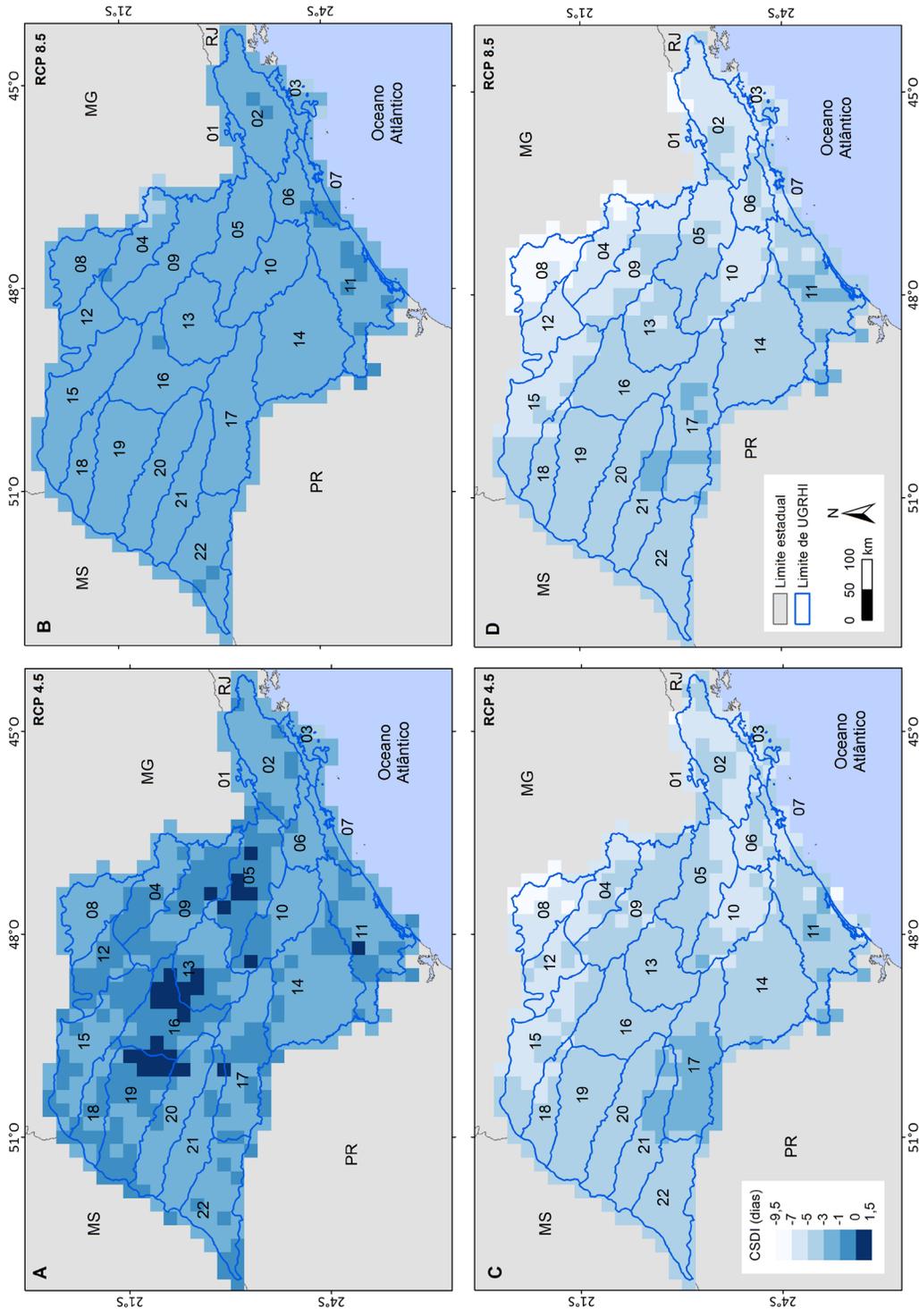


FIGURA 6 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) do número máximo de dias consecutivos no ano com temperatura mínima menor que percentil 10 – CSDI entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022)

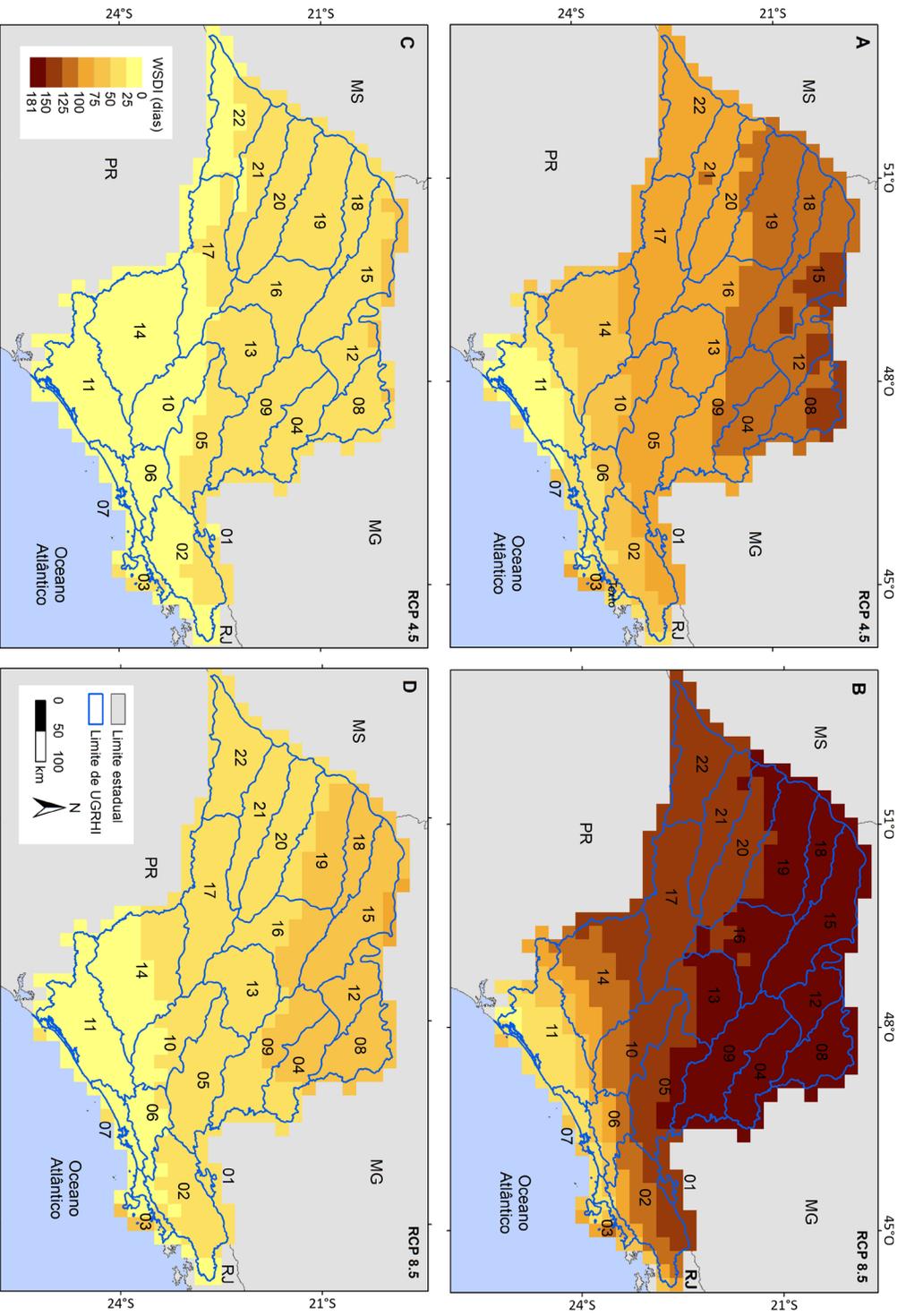


FIGURA 7 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) do número máximo de dias consecutivos no ano com Temperatura máxima maior que percentil 90 (dias) – WSDI entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022)

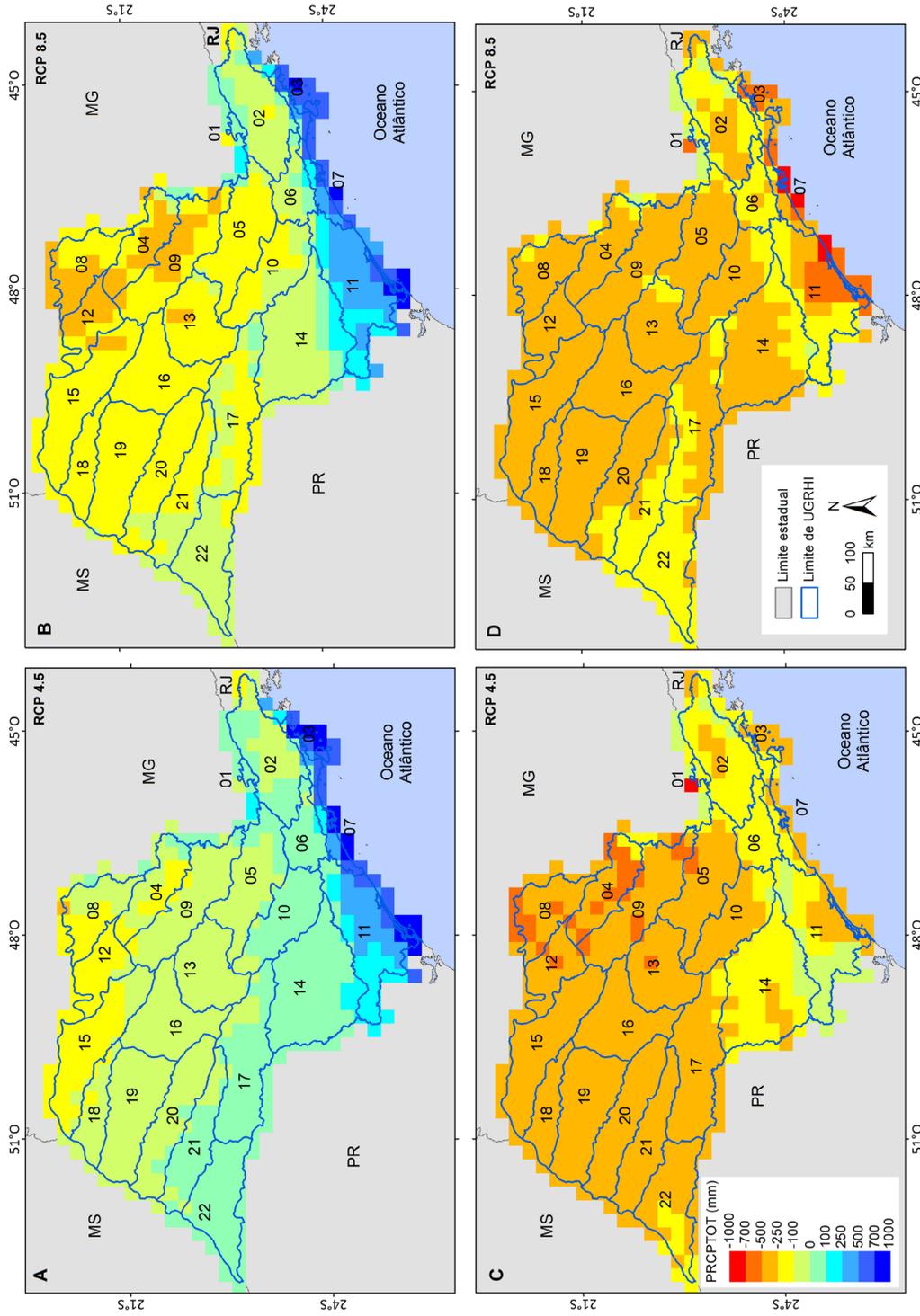


FIGURA 8 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) da Precipitação total (mm) – PRCPTOT, para o estado de São Paulo entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022)

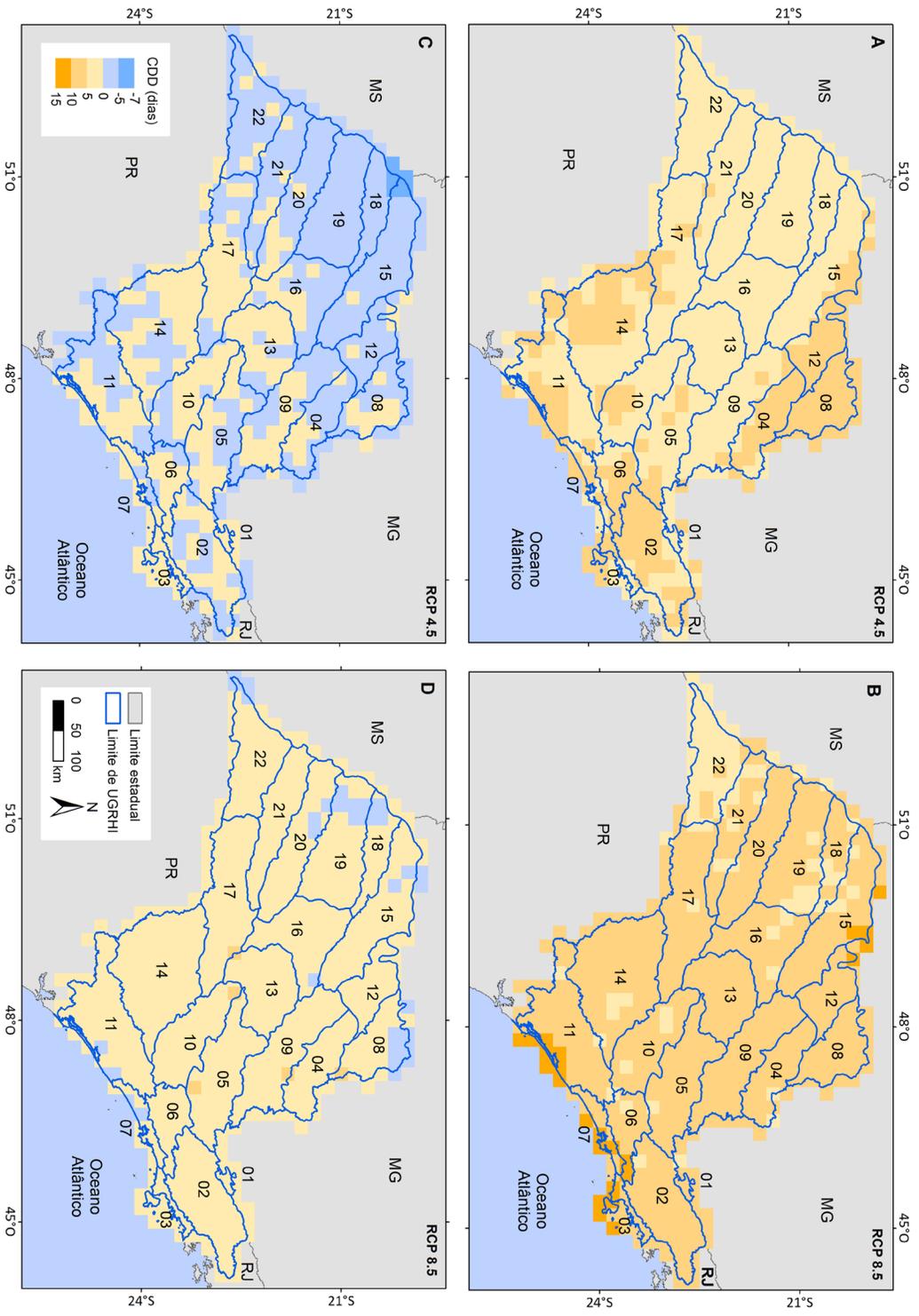


FIGURA 9 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) do número máximo de dias consecutivos sem chuva no ano – CDD para o estado de São Paulo entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022).

A precipitação anual total dos dias em que a precipitação é maior que o percentil 95 (R95p) é indicador de precipitação com intensidade elevada (Figura 10). Observa-se que há grande variabilidade desse índice entre os limites superiores e inferiores de ambos os cenários no território do estado de São Paulo, com projeção de precipitações intensas cada vez mais volumosas nos limites superiores dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, mas também redução do volume precipitado nas chuvas mais intensas nos limites inferiores para os dois cenários.

Os maiores incrementos nas precipitações mais intensas são esperados no limite superior do cenário RCP 4.5 em todo o estado, com os maiores acréscimos na precipitação intensa de até 200 a 300 mm, localizados nas bacias do Alto Ribeira (UGRHI 11 - Ribeira de Iguape/Litoral Sul), Alto Paranapanema (UGRHI 14 - Alto Paranapanema) e baixo curso do rio Paranapanema, como demonstrado na figura 10A. O restante do estado apresenta tendência de aumento de 100 a 200 mm, sendo que no trecho norte o aumento é de até 50 mm (Figura 10A). Para o limite superior do cenário RCP 8.5 os acréscimos são menores; a maioria do estado apresenta acréscimo de até 100 mm nas chuvas mais intensas, sendo que a Serra da Mantiqueira e alguns trechos do Alto Ribeira de Iguape são os locais onde o aumento projetado é mais expressivo (até 200 mm). Em pequenas áreas junto à linha de costa e ao norte do estado há redução de até 50 mm nas precipitações mais intensas (Figura 10B).

Os limites inferiores de ambos os cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5) indicam tendência de redução de volume das precipitações intensas em quase todo o estado de São Paulo, com exceção da área ocupada pelo Planalto Atlântico, com projeção de aumento de até 100 mm. O restante do estado, incluindo a zona costeira, tem projeção de redução no volume precipitado de até 300 mm (Figura 10C e 10D). Assim, toda a amplitude projetada para a média 2020-2050 é bastante elevada, com áreas que podem ter precipitações intensas acrescidas em 300 mm, ou reduzidas na mesma proporção.

Em relação à máxima precipitação acumulada em cinco dias consecutivos (RX5day) os limites superiores das projeções nos dois cenários (Figura 11A e 11B) indicam que podem ocorrer elevação dos totais pluviais, com exceção de trechos do centro e norte do estado, e junto à li-

nha de costa no litoral sul. Os incrementos mais significativos nesse índice ocorrem no cenário RCP 4.5 na área de clima subtropical (Figura 1), enquanto os menores ao norte do limite zonal, na serra da Mantiqueira, vale do Paraíba e serra do Mar e centro norte do estado.

Ao sul do limite zonal (Figura 1), na serra de Paranapiacaba, sobre o divisor das bacias do Alto Paranapanema e Ribeira de Iguape, se prolongando até o trecho sul da Região Metropolitana de São Paulo, estão projetados os maiores aumentos, entre 30 e 45 mm em relação ao período histórico de referência (1961-1990). Das nascentes do Paranapanema até sua foz e regiões limítrofes o desvio acima da normal 1961-1990 varia entre 20 e 30 mm. Nas serras da Mantiqueira e do Mar, ao norte do limite zonal (clima tropical - Figura 1) o aumento projetado varia entre 10 e 20 mm, e no centro e norte do estado até 10 mm, com pequenos trechos de redução de até 10 mm já na divisa com Minas Gerais. No cenário RCP 8.5 a projeção apresenta estrutura espacial relativamente parecida com a do cenário RCP 4.5, mas com intensidade menor, com os maiores incrementos de até 20 mm, e com a área de redução dos totais precipitados nesses eventos extremos (RX5day) aumentada no centro e norte do estado (até 10 mm de redução).

O limite inferior em ambos os cenários também apresenta relativamente a mesma estrutura espacial. A maior parte do território apresenta redução nos totais, sendo mais intensa no cenário RCP 8.5 no centro e norte do estado, e nas regiões metropolitanas de Campinas e de São Paulo, com redução de até 30 mm. O litoral do estado apresenta os maiores valores na redução deste índice, com projeção de diminuição de até 55 mm. A única área com elevação nos totais precipitados é sobre o alto vale do Ribeira de Iguape, para ambos os cenários, e também na serra da Mantiqueira e nas proximidades de Piracicaba, apenas para o RCP 4.5.

5 DISCUSSÃO

O estado de São Paulo está inserido na fachada Atlântica, área sensível a eventos pluviais extremos dada a natureza climática (TARIFA 1994). As projeções relacionadas às precipitações (Figuras 7, 8, 9 e 10) indicam possibilidade de elevação nos totais anuais e em índices de eventos pluviais extremos. TARIFA (1994) já

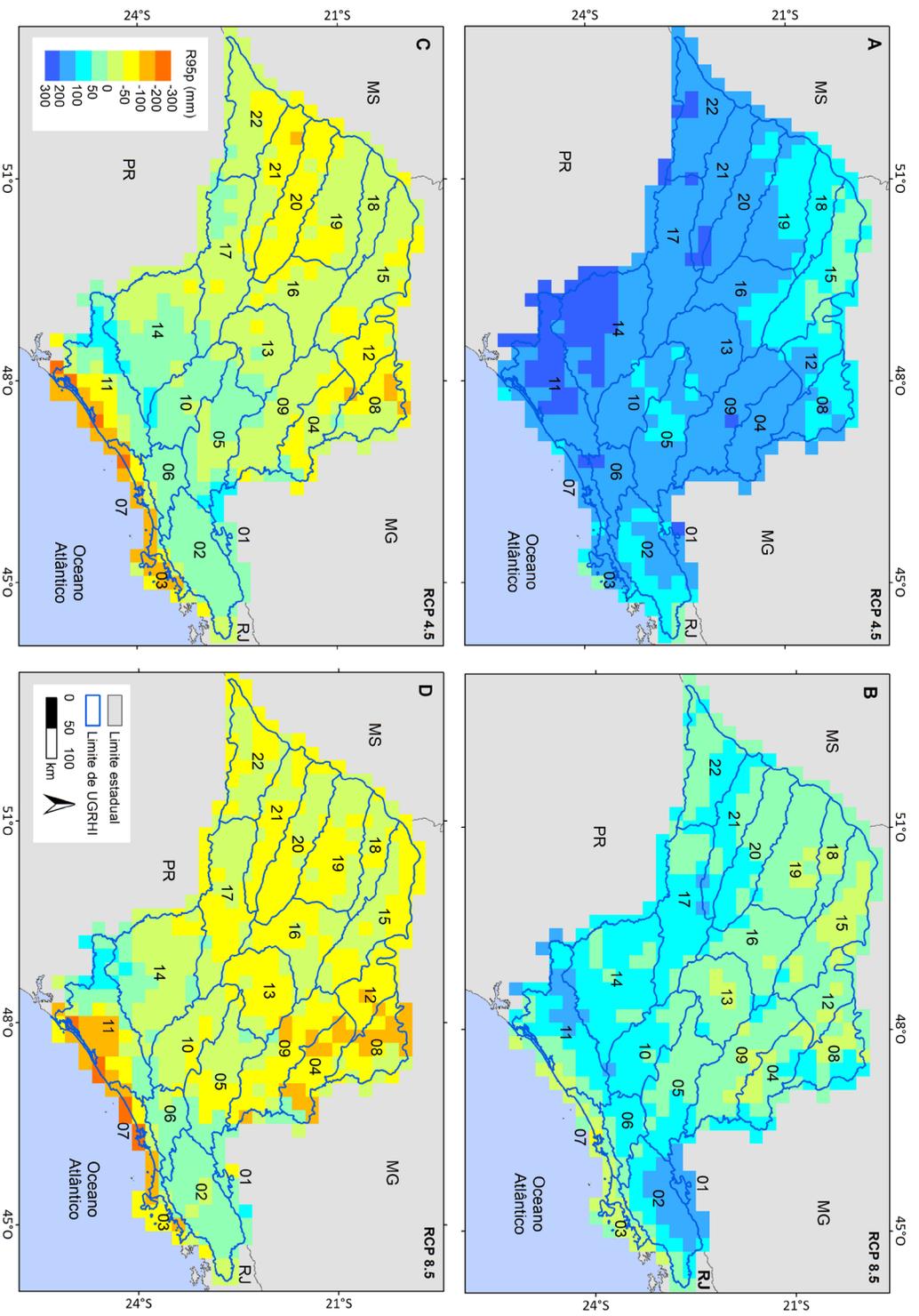


FIGURA 10 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) da Precipitação anual total dos dias em que a chuva é maior que o percentil 95 (mm) – R95p entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022).

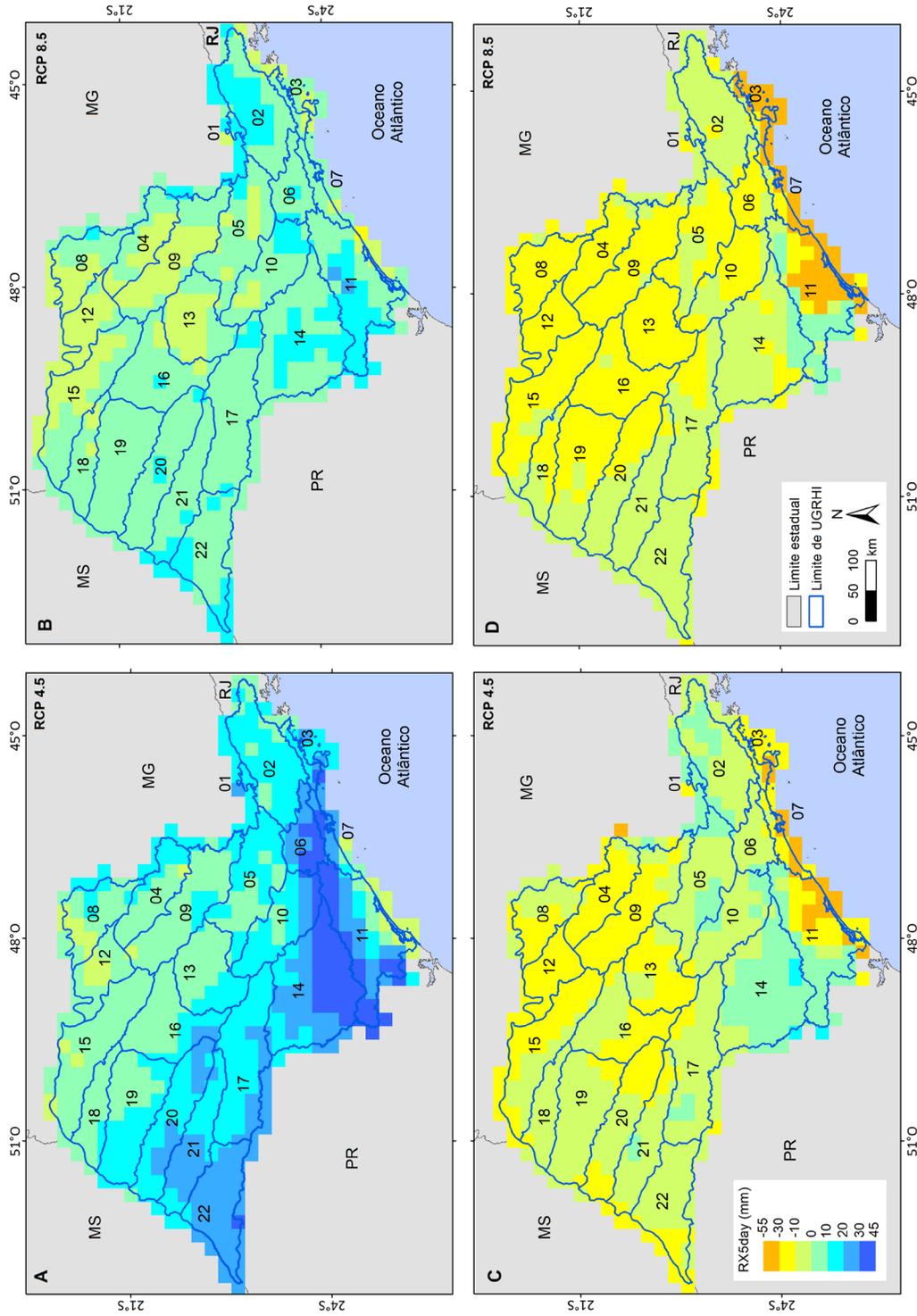


FIGURA 11 – Desvios máximo (imagens superiores) e mínimo (imagens inferiores) da máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (mm) – RX5day entre a projeção 2020-2050 e o período histórico 1961-1990 para o estado de São Paulo sob os cenários RCP 4.5 (A e C) e RCP 8.5 (B e D). Fontes: CPTEC/INPE (2019), IGC (2011) e IBGE (2013). Sistema de Coordenadas Geográficas, Datum SIRGAS 2000. Elaboração: Nádia Lima (2022).

salientava que mudanças na cobertura vegetal das bacias hidrográficas agravavam os impactos causados por tais eventos, pois a magnitude dos desastres deflagrados por eventos meteorológicos fica majorada. Esta situação deve ser ainda mais agravada nas regiões metropolitanas, onde a densidade populacional e o elevado grau de derivação antropogênica dos geossistemas naturais aumentam sobremaneira a vulnerabilidade socioeconômica e ambiental desses lugares. Vale destacar que a demanda de água no litoral já se apresenta alta (SÃO PAULO 2020), principalmente durante o verão, e se ocorrer redução nos totais anuais, como evidenciam as figuras 8C e 8D, sérios problemas de abastecimento hídrico podem ser intensificados, como também destacam ZÁKHIA *et al.* (2021) e FERREIRA & VALVERDE (2022). Por outro lado, o incremento nos totais anuais pode indicar aumento do risco de escorregamentos e outros processos erosivos deflagrados pelas chuvas, principalmente na Serra do Mar, onde a susceptibilidade natural é elevada (ROSSINI-PENTEADO & FERREIRA 2017). As projeções apresentadas também podem resultar em impactos nos ecossistemas costeiros, tais como os manguezais, que são sensíveis mesmo sob cenários de mudanças climáticas mais conservadores (WARD *et al.* 2016, GABLER *et al.* 2017, DUKE *et al.* 2019). Destaca-se que as anomalias da temperatura e de seus índices extremos considerados para o estado de São Paulo, em todos os cenários, podem repercutir em impactos de diversas magnitudes nos recursos naturais, serviços ecossistêmicos, saúde, conforto térmico, entre outros.

ARMANI *et al.* (2021) apontam que os cenários projetados de mudanças climáticas para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) podem limitar a reprodução e proliferação do mosquito transmissor da dengue durante o verão, devido ao aquecimento acima do limite ideal. Por outro lado, ocorrerá uma antecipação, para primavera, e prolongamento, para o outono, dos limites ideais de proliferação do mosquito, podendo tornar a dengue, que era restrita a epidemias de alguns poucos meses, de caráter endêmico ou hiperendêmico.

Em relação à precipitação, MARENCO *et al.* (2013) projetaram para a RMSP aumento da precipitação total e da precipitação intensa, bem como da maior contribuição para a precipitação total de eventos pluviométricos mais intensos.

Os autores também salientaram a possibilidade de períodos secos mais longos para a Região Metropolitana de São Paulo, indicando problemas de abastecimento hídrico para esta região (FERREIRA & VALVERDE 2022).

Por outro lado, as projeções também indicam possibilidade de redução na precipitação total anual e nos outros índices de eventos extremos, sugerindo problemas no abastecimento de água, operação de hidrovias e agricultura. Pequenos e médios produtores rurais, responsáveis pela produção de alimentos para o povo brasileiro são mais vulneráveis às variações na precipitação, bem como os reservatórios que abastecem as Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo (ZÁKHIA *et al.* 2021, FERREIRA & VALVERDE 2022). Na área com maior aumento de temperatura (Figura 3) está a área de recarga do aquífero Guarani, importante fonte de abastecimento de água, que poderá ter uma sobrecarga em relação à demanda hídrica (SÃO PAULO, 2020).

As projeções indicam um aumento de até 10 dias no índice de dias secos consecutivos (CDD) em relação ao período 1961-1900 na maior parte do estado de São Paulo, corroborando os resultados de FERREIRA & VALVERDE (2022), que associam com a redução da disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas, podendo aumentar o risco de desabastecimento em áreas urbanas e eventuais problemas na irrigação de áreas agrícolas (ZÁKHIA *et al.* 2021). ASSAD *et al.* (2013) afirmaram que os efeitos do aquecimento da atmosfera, conforme projetado, teriam impactos econômicos negativos sobre a produção agrícola brasileira, principalmente nas pastagens e grãos, projetando redução na produção de grãos na ordem de 4,6 milhões de toneladas em 2030.

Os resultados alcançados neste trabalho corroboram outros estudos (VIOLA *et al.* 2014, LYRA *et al.* 2017, ZÁKHIA *et al.* 2021, REBOITA *et al.* 2022), revestindo-se de importante guia para elaboração de políticas de adaptação e mitigação climática. No entanto, ainda é preciso considerar que modelos sejam desenvolvidos e/ou aperfeiçoados na avaliação do custo social global (TARIFA & MELLO 1983), principalmente em termos econômicos, pois a política atual e a organização social e econômica continuam provocando reflexos negativos no setor produtivo, na saúde e no bem-estar social.

Além disso, todos os modelos indicam tendência de aumento de temperatura, sendo que o HadGEM2-ES, é aquele que projeta os maiores desvios em relação à média do período histórico (1961-1990), fato que VALVERDE & MARENGO (2010) já indicavam. O aumento projetado para as temperaturas e índices de eventos térmicos extremos apresenta de certo modo a mesma magnitude daquelas apresentadas por outros autores (VALVERDE & MARENGO 2010, MARENGO *et al.* 2012, VIOLA *et al.* 2014, BRASIL 2016, LYRA *et al.* 2017, ZÁKHIA *et al.* 2021, FERREIRA & VALVERDE 2022, REBOITA *et al.* 2022). LYRA *et al.* (2017) também apontam para o encurtamento do período frio.

Em relação à precipitação, os resultados obtidos por LYRA *et al.* (2017) indicam apenas diminuição da precipitação, principalmente na estação chuvosa, e dos índices de eventos pluviais extremos, tendência típica apresentada pelo HadGEM2-ES (ZÁKHIA *et al.* 2021), ou seja, condições mais próximas daquelas projetadas para os limites inferiores dos resultados aqui apresentados. Baseado na classificação de Thornthwaite, LORENÇONE *et al.* (2022) concluem que no bioma do Pantanal, a partir de 2041, ocorrerá redução da área classificada como úmida (B1, B2 e B3), além de adicionar a classe seca subúmida (C1), devido à intensificação da baixa do Chaco projetada para a área (VALVERDE & MARENGO 2010, MARENGO *et al.* 2012). Já os incrementos nos valores de precipitação e seus índices extremos foram resultantes de outros modelos climáticos, principalmente do MIROC5, cuja sensibilidade e ajustes dos parâmetros apontam tendência à umidificação (ZÁKHIA *et al.* 2021), e que, em nosso trabalho, representam, em sua maioria, os limites superiores das projeções de precipitação e seus índices extremos. Vale ressaltar que os diferentes modelos climáticos podem projetar diferentes resultados, tal como observado por BOMBARDI & CARVALHO (2008), que empregando o MIROC, não detectaram nenhum atraso no início da estação chuvosa, e nem na duração em relação ao período histórico, embora a mediana do total acumulado nessa estação tenha aumentado em 80 mm, concentrados na região norte do Brasil.

Essas projeções indicam mudanças também nos padrões de circulação atmosférica na América do Sul, com o enfraquecimento da circulação tropical e fortalecimento da circulação

subtropical, marcado pela intensificação na superfície da Baixa do Chaco e das altas subtropicais (do Atlântico e do Pacífico) (VALVERDE & MARENGO 2010, MARENGO *et al.* 2012). O processo de aumento de ampliação da escala realizado por meio do modelo Eta teve precisão para realçar efeitos topográficos e do oceano Atlântico de modo a melhor representar os processos meteorológicos sobre o estado de São Paulo. Essa melhoria também foi apontada por CHOU *et al.* (2012), quando os primeiros testes de ampliação de escala começaram a rodar no Eta.

Mesmo sob projeções de severo aquecimento e redução de precipitação, como as aqui apresentadas, a conservação das florestas tropicais se faz importante, pois o carbono sequestrado por ela tende a permanecer preservado, bem como esforços no sentido de recuperação das áreas desmatadas, uma vez que a recuperação de metade dessas áreas apresenta potencial para armazenamento de 56 a 69% do CO₂ (KOCH & KAPLAN 2022).

TARIFA & MELLO (1983), décadas atrás, já apontavam que seria necessário a sociedade aprender a lidar com o limite de segurança para uso dos recursos naturais a fim de evitar, ou moderar os efeitos das mudanças climáticas. Os autores sugeriram que o processo fosse iniciado na avaliação e planejamento de áreas críticas visando a possibilidade de recuperação ou reaproveitamento delas, onde os problemas se mostrassem mais evidentes. Esta tarefa poderia ser melhorada após os avanços recentes no cadastro sistemático de ocorrências de desastres naturais, tais como aqueles realizados por BROLLO & FERREIRA (2016) e SÃO PAULO (2022).

Os modelos globais empregados atualmente já estão evoluídos para embasar decisões políticas, sociais e econômicas, pois já contemplam, além dos processos físicos, parte significativa das interferências humanas na atmosfera em diferentes escalas. Os modelos climáticos são as melhores ferramentas que a ciência dispõe para fazer previsões climáticas (VALVERDE & MARENGO 2010) e melhor embasar decisões políticas e técnicas.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As projeções climáticas para o período 2020-2050 no estado de São Paulo foram produzidas em resolução relativamente elevada

(20 km), utilizando-se da técnica de *downscaling* por meio do modelo regional do CPTEC Eta, a partir de dois cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5) de quatro modelos climáticos (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM). Os resultados foram apresentados em termos de desvios do período futuro (2020-2050) em relação ao período histórico 1961-1990. A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que:

1. do ponto de vista da temperatura do ar, todos os modelos utilizados para os dois cenários e seus limites inferiores e superiores apontam para o aquecimento da atmosfera, ou seja, os modelos convergem em todas as projeções para temperatura. Embora não seja possível precisar exatamente de quanto será o aquecimento, é possível, com o conhecimento atual e técnicas disponíveis, afirmar que a atmosfera estará mais quente, e que a sociedade precisará se adaptar a limites diferentes daqueles que convive atualmente.
2. O aquecimento projetado tende a ser menos intenso na fachada litorânea devido ao controle exercido pelo oceano, enquanto os maiores no trecho noroeste do estado, mais distante do Atlântico. As áreas mais elevadas, como a serra da Mantiqueira, apresentaram diferentes comportamentos na tendência térmica em função do cenário (RCP 4.5 ou RCP 8.5), sugerindo que o relevo desempenha papéis diferentes a depender da concentração dos gases estufa.
3. Há projeção de redução na duração de ondas de frio (CSDI), sendo que essa tendência aumenta de sul para norte do estado. Por outro lado, está projetado aumento na duração das ondas de calor (WSDI), com variação espacial semelhante ao das ondas de frio, com aumento na duração de sul para norte.
4. Em relação à precipitação não há consenso de tendência entre os modelos empregados no estudo, com alguns projetando aumento e outros redução nos totais anuais de precipitação e índices extremos relacionados. Portanto, quanto maior a amplitude entre os limites máximo e mínimo de precipitação, maior deve ser a capacidade de adaptação da sociedade.
5. É projetada para a maior parte do estado a redução nos totais anuais de precipitação,

sendo que no norte e noroeste todos os modelos e cenários indicam tendência de redução. Do ponto de vista climatológico, e com as projeções consensuais na temperatura, a redução na precipitação é o pior cenário a ser enfrentado, dado o caráter essencial à vida que a água se reveste. A agricultura e o abastecimento de água nas cidades podem sofrer seriamente nessas condições caso ajustes nas ações de consumo, armazenamento e recuperação de áreas produtoras de água (nascentes) não sejam adequados à nova realidade.

6. Os indicadores relacionados à precipitação intensa (R95p e RX5day) evidenciaram grande amplitude entre os valores máximos e mínimos projetados nos cenários analisados. Cabe destacar que, principalmente, o aumento desses indicadores merece especial atenção, visto que precipitações intensas cada vez mais volumosas são potenciais deflagradores de desastres naturais, tais como escorregamentos, inundações e erosão acelerada, afetando principalmente regiões naturalmente suscetíveis do ponto de vista geotécnico, como a UGRHI 11 (Ribeira de Iguape/Litoral Sul), UGRHI 14 (Alto Paranapanema), UGRHI 06 (Alto Tietê), UGRHI 07 (Baixada Santista), UGRHI 03 (Litoral Norte), entre outras.

As pesquisas para aprimorar os resultados alcançados já estão sendo realizadas, buscando caracterizar as variações sazonais para os mesmos dados e modelos, de forma a complementar a plataforma de dados do ZEE (Zoneamento Ecológico-Econômico) do estado de São Paulo. Igualmente, esforços vêm sendo realizados no sentido de melhorar a escala de representação dos dados (*downscaling*) utilizando o modelo Eta do CPTEC, ampliando para 5 km a resolução de representação dos dados para todo o estado de São Paulo. Ressalta-se que essa foi uma primeira aproximação sobre as projeções climáticas para o estado de São Paulo, visando sua incorporação no planejamento ambiental territorial com foco em variáveis específicas e índices de extremos climáticos, com definição de um processo metodológico que poderá ser replicado para futuras análises em outras temáticas.

Salienta-se que os cenários futuros de clima devem ser considerados como situações de prováveis mudanças, projetadas muito em fun-

ção das concentrações de gases de efeito estufa, sendo que a evolução real nas concentrações desses gases não deve ocorrer da forma como é modelada, elevando o grau de incerteza das simulações. No entanto, aprimoramentos na modelagem são permanentes e muito rápidos, e os modelos são a melhor ferramenta que a ciência dispõe atualmente para discutir projeções climáticas e embasar decisões.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Dra. Chou Sin San e ao Dr. André Lyra (INPE/CPTEC) pelo suporte metodológico e orientação durante a execução deste estudo; ao Prof. Dr. Tércio Ambrizzi (IAG-USP) pela colaboração nas reuniões; à consultoria GE21 pelo suporte técnico; a todos os integrantes da Secretaria Executiva do ZEE/SP (CPLA); e aos pareceristas de Derbyana que contribuíram para a melhoria do manuscrito.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A.M.G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L. 2005. Global observed changes in daily climatic extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111: 1-22. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- ARMANI, G; TAVARES, R.; RIBEIRO, F.S.; MIRANDA, M.J. 2021. *São Paulo/SP: incidência e espacialização da dengue na metrópole paulistana*. In: F.A. Mendonça (Org.) A dengue no Brasil: uma perspectiva geográfica. Curitiba, CRV Editora, 1ª ed., p. 379-422.
- ASSAD, E.; PINTO, H.S; NASSAR, A.; HARFUCH, L.; FREITAS, S.; FARINELLI, B.; LUNDELL, M.; FERNANDES, E.C.M. 2013. *Impacts of climate change on brazilian agriculture*. Washington, International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 86 p. Disponível em <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/18740/687740Revised00LIC00web0brasil02030.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acessado em set. 2022.
- BJØRNÆS, C. 2013. *A guide to Representative Concentration Pathways*. CICERO, Center for International Climate and Environmental Research, 5 p.
- BOMBARDI, R.J.; CARVALHO, L. 2008. Variability of the monsoon regime over Brazil: the present climate and projections for a 2xCO₂ scenario using MIROC model. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(1): 58-72. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000100007>
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. 2016a. *Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. 2016b. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Resumo Executivo e Sumário*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3es.pdf>. Acessado em set. 2022.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. 2016c. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume I*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v1.pdf>. Acessado em set. 2022.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e

- Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. 2016d. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – II*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v2.pdf>. Acessado em set. 2022.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. 2016e. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume III*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v3.pdf>. Acessado em set. 2022.
- BROLLO, M.J.; FERREIRA, C.J. 2016. *Gestão de riscos de desastres devido a fenômenos geodinâmicos no Estado de São Paulo: Cenário 2000-2015*. São Paulo: Instituto Geológico, 72 p. (Boletim, 67). Disponível em <http://bit.ly/2LgEqbm>
- CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. 2012. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, 38: 635-653. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8>
- CHOU, S.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. 2014a. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3: 512-527. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. 2014b. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3: 438-454. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- CPTEC/INPE – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS/ INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2019. *Dados gerados pelo CPTEC/INPE disponibilizados na plataforma PROJETA*. Disponível em www.projeta.cptec.inpe.br. Acessado em 01 mar. 2019.
- DUKE, N.C.; FIELD, C.; MACKENZIE, J.R.; MEYNECKE, J.-O.; WOOD, A.L. 2019. Rainfall and its possible hysteresis effect on the proportional cover of tropical tidal-wetland mangroves and saltmarsh-salt pans. *Marine and Freshwater Research*, 70(8): 1047-1055. <https://doi.org/10.1071/MF18321>
- FERREIRA, B.C.C.; VALVERDE, M.C. 2022. Análise dos índices de extremos de precipitação em cenários futuros na bacia do Rio Ribeira de Iguape - São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(1). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786370067>
- GABLER, C.; OSLAND, M.J.; GRACE, J.B.; STAGG, C.L.; DAY, R.H.; HARTLEY, S.B.; ENWRIGHT, N.M.; FROM, A.S., MCCOY, M.L.; MCLEOD, J.L. 2017. Macroclimatic change expected to transform coastal wetland ecosystems this century. *Nature Climate Change*, 7: 142-147. <https://doi.org/10.1038/nclimate3203>
- GRIMM, A.M.; NATORI, A. 2006. Climate change and interannual variability of precipitation in South America. *Geophysical Research Letters*, 33: L19706. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL026821>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022. *Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2021*. Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101849.pdf>. Acessado em 10 jun. 2022.

- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007. *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*. R.K. Pachauri, and A. Reisinger (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, In press, <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>
- KOCH, A.; KAPLAN, J.O. 2022 Tropical forest restoration under future climate change. *Nature Climate Change*, 12: 279-283. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01289-6>
- LI, J.; BARKER, H.W. 2005. A Radiation Algorithm with Correlated-k Distribution. Part I: Local Thermal Equilibrium. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(2): 286-309. <https://doi.org/10.1175/JAS-3396.1>
- LORENÇONE, J.A.; APARECIDO, L.E.O.; LORENÇONE, P.A.; LIMA, R.F.; TORSONI, G.B. 2022. Assessment of climate change using humidity index of Thornthwaite climate classification in Pantanal biome. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(1): 99-119. <https://doi.org/10.1590/0102-7786370075>
- LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.P.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. 2017. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, 132: 663-682. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>
- MACHADO, C.B.; CAMPOS, T.L.O.B.; RAFEE, S.A.A.; MARTINS, J.A.; GRIMM, A.M.; 2021. Extreme rainfall events in the Macro-Metropolis of São Paulo: trends and connection with climate oscillations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60(5): 661-675. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0173.1>
- MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W.R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. 2012. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38: 1829-1848. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- MARENGO, J.A.; VALVERDE, R.; OBREGON, G.O. 2013. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. *Climate Research*, 57(1): 61-72. <http://dx.doi.org/10.3354/cr01160>
- MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T.J.; JONES, C.D.; MCDONALD, R.E.; MCLAREN, A.J.; O'CONNOR, F.M.; ROBERTS, M.J.; RODRIGUEZ, J.M.; WOODWARD, S.; BEST, M.J.; BROOKS, M.E.; BROWN, A.R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S.H.; DHARSSI, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J.M.; FALLOON, P.D.; GEDNEY, N.; GRAY, L.J.; HEWITT, H.T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M.R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W.J.; JAMES, P.M.; JOHNS, T.C.; JOHNSON, C.E.;

- JONES, A.; JONES, C.P.; JOSHI, M.M.; KEEN, A.B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A.P.; MAIDENS, A.V.; MANNERS, J.C.; MILTON, S.F.; RAE, J.G.L.; RIDLEY, J.K.; SELLAR, A.; SENIOR, C.A.; TOTTERDELL, I.J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P.L.; WILTSHIRE, A. 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model Climate configurations, *Geoscientific Model Development*, 4: 723-757.
- MEEHL, G.A.; ARBLASTER, J.M.; TEBALDI, C. 2005. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, 32: L18719. <http://doi.org/10.1029/2005GL023680>
- MONTEIRO, C.A.F. 1973. *A dinâmica climática e as chuvas no estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de atlas*. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 129 p.
- MONTEIRO, C.A.F. 1976. O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo: problemas e perspectivas. *Teses e monografias - IGEOG/USP*, 28: 54 p.
- MOSS, R.H.; BABIKER, M.; BRINKMAN, S.; CALVO, E.; CARTER, T.; EDMONDS, J.A.; ELGIZOULI, I.; EMORI, S.; LIN, E.; HIBBARD, K.; JONES, R.; KAINUMA, M.; KELLEHER, J.; LAMARQUE, J.F.; MANNING, M.; MATTHEWS, B.; MEEHL, J.; MEYER, L.; MITCHELL, J.; NAKICENOVIC, N.; O'NEILL, B.; PICHES, R.; RIAHI, K.; ROSE, S.; RUNCI, P.J.; STOUFFER, R.; VANVUUREN, D.; WEYANT, J.; WILBANKS, T.; VAN YPERSELE, J.P.; ZUREK, M. 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. United States. Disponível em <https://www.osti.gov/biblio/940991>. Acessado em set. 2022.
- MOSS, R.; EDMONDS, J.; HIBBARD, K.A.; MANNING, M.R.; ROSE, S.K.; VAN VUUREN, D.P.; CARTER, T.R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G.A.; MITCHELL, J.F.B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S.J.; STOUFFER, R.J.; THOMSON, A.M.; WEYANT, J.P.; WILBANKS, T.J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- NATIVIDADE, U.A.; GARCIA, S.R.; TORRES, R.R. 2017. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4): 600-614. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324008>
- NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. 2022. *Global monitoring Laboratory, GGGRN Data - CO₂*. Disponível em <https://gml.noaa.gov/ccgg/data/co2.html>. Acessado em set. 2022.
- NOBRE, P.; SIQUEIRA, L.P.; ALMEIDA, R.A.F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G.P.; BOTTINO, M.J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S.N.; COSTA, M.C.; BAPTISTA JR., M.; IRBER JR., L.; MARCONDES, G.G. 2013. Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. *Journal of Climate*, 26: 6716-6732. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>
- OBREGON, G.O.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C. 2014. Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. *Climate Research*, 61: 93-107. <https://doi.org/10.3354/cr01241>
- PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. 2014. *PBMC, 2014: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do grupo de trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas*. T. Ambrizzi & M. Araújo (eds.). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 p.
- POPE, V.; BROWN, S.; CLARK, R.; COLLINS, M.; COLLINS, W.; DEARDEN, C.; GUNSON, J.; HARRIS, G.; JONES, C.; KEEN, A.; LOWE, J.; RINGER, M.; SENIOR, C.; SITCH, S.; WEBB, M.; WOODWARD, S. 2007. The Met Office Hadley Centre climate modelling capability: the competing requirements for improved resolution, complexity and dealing with

- uncertainty. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365: 2635-2657. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2087>
- REBOITA, M.S.; KUKI, C.A.C.; MARRAFON, V.H.; SOUZA, C.A.; FERREIRA, G.W.S.; TEODORO, T.; LIMA, J.W.M. 2022. South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Climate Dynamics*, 58: 459-485. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>
- RIBEIRO NETO, G.G.; ANDERSON, L.O.; BARRETOS, N.J.C.; ABREU, R.; ALVES, L.; DONG, B.; LOTT, F.C.; TETT, S.F.B. 2022. Attributing the 2015/2016 Amazon basin drought to anthropogenic influence. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1): e25. <https://doi.org/10.1002/cli2.25>
- ROSSINI-PENTEADO, D.; FERREIRA, C.J. 2017. *Sistema de classificação "Unidades Territoriais Básicas" (UTB) e mapeamento de risco de áreas urbanas de uso residencial/comercial/serviços à eventos geodinâmicos do Estado de São Paulo*. IG, São Paulo. Disponível em <http://bit.ly/2W7RnZb>.
- SÃO PAULO (Estado). SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. 2020. *Meio ambiente paulista: relatório de qualidade ambiental 2020*. São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 424 p.
- SÃO PAULO (Estado). SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2022. *Cadastro de eventos geodinâmicos e desastres do Estado de São Paulo 1991-2020*. Planilha eletrônica On-line. Disponível em https://docs.google.com/spreadsheets/d/1uEIUITGvYArX23E6YpycYLtObaA_YmdK8559wBCY-TI/edit#gid=2018359881.
- SCHWALMA, C.R.; GLENDONA, S.; DUFFYA, P.B. 2020. RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *PNAS*, 117(33): 19656-19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>
- TARIFA, J.R. 1994. Alterações climáticas resultantes da ocupação agrícola no Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, 8: 15-27. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0002>
- TARIFA, J.R.; MELLO, M. 1983. O homem e as mudanças climáticas no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, *Anais*, p. 319-338.
- VALVERDE, M.C.; MARENGO, J.A. 2010. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC Ar4. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(1): 125-145. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000100011>
- VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109: 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B.; GONZÁLEZ, P. 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters*, 33: L13707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025759>
- VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C.; MELLO, C.R.; LIMA, S.O.; ALVES, M.V.G. 2014. Distribuição e potencial erosivo das chuvas no Estado do Tocantins. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(2): 125-135. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000200007>
- VON SALZEN, K.; MCFARLANE, N.A.; LAZARE, M. 2005. The role of shallow convection in the water and energy cycles of the atmosphere. *Climate Dynamics*, 25: 671-688. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0051-2>
- VON SALZEN, K.; SCINOCCA, J.F.; MCFARLANE, N.A.; LI, J.; COLE, J.N.S.; PLUMMER, D.; VERSEGHY, D.; READER, M.C.; MA, X.; LAZARE, M.; SOLHEIM, L. 2013. The Canadian Fourth Generation Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Part I: Representation of Physical Processes. *Atmosphere-Ocean*, 51(1): 104-125, <https://doi.org/10.1080/07055900.2012.755610>
- WARD, R.D.; FRIESS, D.A.; DAY, R.H.; MACKENZIE, R.A. 2016. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a

region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4): e01211. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1211>

Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23): 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. 2010. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States,

ZÁKHIA, E.M.S.; ALVARENGA, L.A.; TOMASELLA, J.; MARTINS, M.A.; SANTOS, A.C.N.; MELO, P.A. 2021. Impacto das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no sul do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(4): 667-681. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786360002>

Endereço dos autores:

Gustavo Armani*, Nádia Gilma Beserra de Lima – Instituto de Pesquisas Ambientais, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Rua Joaquim Távora, 822, Vila Mariana, CEP 04015-011, São Paulo, SP, Brasil. *E-mails:* garmani@sp.gov.br; nadiag@sp.gov.br

Maria Fernanda Pelizzon Garcia – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, Av. Professor Frederico Hermann Júnior, 345, Alto de Pinheiros, CEP 05459-900, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* mfgarcia@sp.gov.br

Jussara de Lima Carvalho – Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Av. Professor Frederico Hermann Júnior, 345, Alto de Pinheiros, CEP 05459-010, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* jlcarvalho@sp.gov.br

*Autor correspondente

Artigo submetido em 26 de setembro de 2022, aceito em 30 de outubro de 2022.

