

PACO  EDITORIAL

Neyval Costa Reis Junior

Carlos Afonso Nobre

Jane Meri Santos

José Eduardo Macedo Pezzopane

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS

EFEITOS SOBRE O  
ESPÍRITO SANTO

Mudanças Climáticas: Efeitos sobre o Espírito Santo



Neyval Costa Reis Junior  
Carlos Afonso Nobre  
Jane Meri Santos  
José Eduardo Macedo Pezzopane

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS

EFEITOS SOBRE O  
ESPÍRITO SANTO

PACO  EDITORIAL

---

## Conselho Editorial

Profa. Dra. Andrea Domingues  
Prof. Dr. Antônio Carlos Giuliani  
Prof. Dr. Antonio Cesar Galhardi  
Profa. Dra. Benedita Cássia Sant'anna  
Prof. Dr. Carlos Bauer  
Profa. Dra. Cristianne Famer Rocha  
Prof. Dr. Cristóvão Domingos de Almeida  
Prof. Dr. Eraldo Leme Batista  
Prof. Dr. Fábio Régio Bento  
Prof. Dr. Gustavo H. Cepolini Ferreira  
Prof. Dr. Humberto Pereira da Silva  
Prof. Dr. José Ricardo Caetano Costa

Prof. Dr. José Rubens Lima Jardimino  
Prof. Dr. Juan Droguett  
Profa. Dra. Ligia Vercelli  
Prof. Dr. Luiz Fernando Gomes  
Prof. Dr. Marco Morel  
Profa. Dra. Milena Fernandes Oliveira  
Prof. Dr. Narciso Laranjeira Telles da Silva  
Prof. Dr. Ricardo André Ferreira Martins  
Prof. Dr. Romualdo Dias  
Profa. Dra. Rosemary Dore  
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus  
Profa. Dra. Thelma Lessa  
Prof. Dr. Victor Hugo Veppo Burgardt

---

©2023 Neyval Costa Reis Junior; Carlos Afonso Nobre;  
Jane Meri Santos; José Eduardo Macedo Pezzopane

Direitos desta edição adquiridos pela Paco Editorial. Nenhuma parte desta obra pode ser apropriada e estocada em sistema de banco de dados ou processo similar, em qualquer forma ou meio, seja eletrônico, de fotocópia, gravação, etc., sem a permissão da editora e/ou autor.

---

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO  
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

---

M916

Mudanças climáticas: efeitos sobre o Espírito Santo / Neyval Costa Reis Junior ... [et al.]. - 1. ed. - Jundiaí [SP] : Paco, 2023.  
248 p. ; 21 cm.

ISBN: 978-85-462-2475-3

1. Mudanças climáticas. 2. Abastecimento de água - Espírito Santo. 3. Desenvolvimento de recursos hídricos - Espírito Santo. 4. Sustentabilidade. I. Reis Junior, Neyval Costa. II. Título.

23-86039

CDD: 363.61098152  
CDU: 556.18:628.1(815.2)

---

Meri Gleice Rodrigues de Souza - Bibliotecária - CRB-7/6439

PACO  EDITORIAL

Av. Carlos Salles Block, 658  
Ed. Altos do Anhangabaú, 2º Andar, Sala 21  
Anhangabaú - Jundiaí-SP - 13208-100  
11 4521-6315 | 2449-0740  
contato@editorialpaco.com.br

Foi feito Depósito Legal.

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) e à Vale S.A. pelo financiamento desta obra por meio do apoio ao Instituto de Estudos Climáticos do Espírito Santo, formalizado pelo Acordo de COOPERAÇÃO TÉCNICA E FINANCEIRA N° 002/2018 - Vale/ITV/Ufes/Fapes (Projeto FAPES 81382545).



# SUMÁRIO

<b>PREFÁCIO</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
	<i>Wagner Rodrigues Soares</i>
<b>CAPÍTULO 1</b> <b>CONCEITOS BÁSICOS PARA O</b> <b>ENTENDIMENTO SOBRE AS</b> <b>MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b>	<b>17</b>
	<i>Wagner Rodrigues Soares</i>
<b>CAPÍTULO 2</b> <b>PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA</b> <b>O ESPÍRITO SANTO</b>	<b>41</b>
	<i>Wagner Rodrigues Soares</i>
<b>CAPÍTULO 3</b> <b>MUDANÇAS CLIMÁTICAS E</b> <b>RECURSOS HÍDRICOS</b>	<b>71</b>
	<i>Antônio A. Meira Neto</i> <i>Franciéli de Paula Dela Costa</i> <i>Diogo Costa Buarque</i>
<b>CAPÍTULO 4</b> <b>RESILIÊNCIA URBANA ÀS MUDANÇAS</b> <b>CLIMÁTICAS – ESTUDO DE CASO:</b> <b>INUNDAÇÕES NA BACIA DE</b> <b>BENTO FERREIRA EM VITÓRIA, ES</b>	<b>111</b>
	<i>Ingrid Tonon</i> <i>Kátia Cañellas</i>

**CAPÍTULO 5**  
**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA NO**  
**ESPÍRITO SANTO**

**145**

*Marcos Góes Oliveira*  
*Madles Queiroz Martins*  
*Fábio Luiz Partelli*

**CAPÍTULO 6**  
**“UM ALERTA VERMELHO PARA A**  
**HUMANIDADE”: OS TRÊS RELATÓRIOS**  
**DE AVALIAÇÃO (AR6) DO IPCC**  
**DE 2021 E 2022**

**177**

*Wagner Rodrigues Soares*  
*Wesley de Souza Campos Correa*

**SOBRE OS AUTORES**

**243**

## PREFÁCIO

Os seres humanos estão influenciando cada vez mais o clima e a temperatura da Terra. O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) da ONU demonstra, em seu mais recente relatório, que a influência humana nas mudanças climáticas é inequívoca, induzindo significativas alterações no clima e causando mudanças observadas em extremos climáticos, como ondas de calor, forte precipitação, secas e tempestades.

Os últimos dados do IPCC demonstram que as concentrações atmosféricas de Gases de Efeito Estufa (GEE) têm se elevado consideravelmente desde a Revolução Industrial. Notadamente, as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> são mais altas do que em qualquer outro momento em pelo menos 2 milhões de anos, e as de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O foram as maiores em pelo menos 800.000 anos. Desde 1750, os aumentos nas concentrações de CO<sub>2</sub> (47%) e CH<sub>4</sub> (156%) excedem em muito as mudanças que ocorreram naturalmente ao longo de milhares de anos no planeta. Considerando os últimos 2000 anos, a temperatura da superfície global aumentou mais rápido desde 1970 que em qualquer outro intervalo de 50 anos. Os extremos de calor se tornaram mais frequentes e mais intensos na maioria das regiões terrestres desde 1950, enquanto os extremos de frio tornaram-se menos frequentes e menos graves.

O aquecimento global intensificou o ciclo global da água, incluindo sua variabilidade, precipitação global e a severidade de eventos úmidos e secos, com consequências significativas para a agricultura e desastres naturais. Segundo o IPCC, é muito provável que eventos de forte precipitação e estiagem se intensifiquem e se tornem ainda mais frequentes, levando a episódios mais frequentes de inundações e secas, como já se tem observado nos noticiários atuais. A mudança climática induzida pelo homem contribuiu para o aumento das secas agrícolas e ecológicas em diversas regiões devido ao aumento da evapotranspiração do solo. Também, a influência humana vem elevando a chance de eventos climáticos extremos desde a década de 1950, incluindo aumentos na frequência de ondas de calor e secas, clima propício a incêndios e inundações.

Os resultados de modelos de projeção de cenários climáticos futuros demonstram que a temperatura da superfície global continuará a aumentar até, pelo menos, o meio do século em todos os cenários de emissões considerados, mesmo com as políticas mais agressivas de redução de emissões. Estima-se que o aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C será excedido durante o século XXI, a menos que diminuições profundas nas emissões de CO<sub>2</sub> e de outros GEE ocorram nas próximas décadas.

Dessa forma, é extremamente importante planejar ações de mitigação e adaptação para cada região. Ações de mitigação são focadas na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para evitar ou reduzir a mudança do clima. Ações de adaptação, por sua vez, estão relacionadas a agir para se adaptar aos efeitos atuais das mudanças climáticas e preparar para impactos previstos no futuro.

Em 2021, o estado do Espírito Santo (ES) aderiu oficialmente às campanhas “*Race to Zero*” (Corrida para o Zero) e “*Race to Resilience*” (Corrida para a Resiliência), da Organização das Nações Unidas (ONU), comprometendo-se com a realização de ações visando a neutralização de emissões de gases de efeito estufa até 2050 e a resiliência relacionada às mudanças climáticas.

Como parte dessas ações, o estado do Espírito Santo criou o Fórum Estadual de Mudanças Climáticas, que é presidido pelo seu governador, e tem representantes das secretarias de Estado, órgãos e autarquias, além de representantes da Federação das Indústrias do Espírito Santo (Findes); da Federação da Agricultura e Pecuária do Estado (Faes); da Federação das Empresas de Transportes do Estado do Espírito Santo (Fetransportes); da Coordenação Estadual de Proteção e Defesa Civil, Procuradoria Geral do Estado (PGE); da Assembleia Legislativa do Estado do Espírito Santo (Ales); Associação Nacional de Órgãos Municipais de Meio Ambiente (Anama) e um da Associação dos Municípios do Espírito Santo (Amunes), Conselho Estadual de Meio Ambiente (Consema), que representam a sociedade civil organizada e o setor produtivo. As decisões do Fórum Estadual de Mudanças Climáticas são baseadas nos direcionamentos técnicos da Comissão Estadual de Mudanças Climáticas, que propõe as ações que devem constituir o Plano Estadual de Mu-

danças Climáticas e representam o conjunto de projetos e estratégias a serem adotadas pelo estado do Espírito Santo para enfrentar as causas e efeitos das mudanças climáticas.

A Comissão Estadual de Mudanças Climáticas realizou reuniões com representantes de 4 Estados da Federação (Minas Gerais, Pernambuco, Paraná e São Paulo), que já construíram ou estão construindo seus Planos Estaduais de Enfrentamento às Mudanças Climáticas, de maneira a analisar os elementos, ações e estratégias necessários para construção do plano estadual do ES e avaliar os principais desafios em sua elaboração e implementação. Assim, como resultado dessas ações, foi elaborado o documento “Nota Conceitual para elaboração do Plano Estadual de Mudanças Climáticas” (CEMC, 2021), que descreve 24 ações necessárias para o enfrentamento das questões relacionadas às mudanças climáticas no ES.

O conjunto de ações previstas para o Plano Estadual de Mudanças Climáticas requer extenso trabalho de pesquisa de alternativas tecnológicas para a mitigação das emissões de GEE e confecção de instrumentos para diagnóstico e subsídio ao processo de tomada de decisão. É importante salientar que tal esforço de pesquisa não deve apenas incluir especialistas e pesquisadores nos temas afetos à mitigação e à adaptação, mas também os setores do governo do Estado, setores privados e a sociedade civil organizada. A lista completa de elementos necessários para a construção do Plano inclui itens que vão desde as ações de construção/adaptação de infraestrutura para as novas condições climáticas até a implementação de instrumentos de financiamento para apoiar as modificações necessárias na matriz energética, transportes, processos industriais e demais atividades relacionadas. Entretanto, é importante explicitar que a criação de planos ou estratégias específicas de enfrentamento das questões climáticas requer o desenvolvimento de ferramentas/instrumentos iniciais para diagnóstico e subsídio ao processo de decisão.

Nesse contexto, a Universidade Federal do Espírito Santo, a Fapes e a Vale criaram, por meio de um acordo de cooperação, o Instituto de Estudos Climáticos do Espírito Santo (IEC-ES), com o objetivo de estimular a formação e a qualificação de pesquisadores nas temáticas de mudanças climáticas e de integrar competências

entre academia e setor produtivo. Suas ações visam contribuir para que as atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação sejam potencializadas, estimuladas e fortalecidas, com geração de produtos, processos e resultados técnico-científicos capazes de responder às questões de interesse comuns no tocante às mudanças climáticas e seu impacto socioeconômico, tecnológico e ambiental, particularmente no estado do Espírito Santo; e promover o desenvolvimento de competências locais nas IES capixabas e nas IES parceiras em nível nacional e internacional.

Cada vez mais, o clima, seus eventos e variações estão demandando respostas não somente da ciência, mas também para informar as políticas públicas de abrangência local, nacional e global. Isso porque o que se tem observado em terras capixabas não são eventos isolados, pois ocorrem em outros territórios do Brasil e do mundo. Particularmente, são longos períodos de estiagem, altas temperaturas, chuvas mal distribuídas, fragilidade dos solos, e o enfrentamento, em 2016, da pior seca dos últimos 80 anos. De maneira global, esses e outros eventos e desastres naturais de magnitude surpreendente para a ciência e para a sociedade em geral impactam todos os setores da vida social, econômica e o meio ambiente. Em resposta, com o paulatino uso da tecnologia, principalmente do poder de observação da Terra a partir do espaço e da capacidade de modelar computacionalmente o sistema climático, a ciência climática vem ancorando seu arcabouço em diversificadas pesquisas interdisciplinares. Ao mesmo tempo, essa área de estudo protagoniza a necessidade de mais investimentos de fontes públicas e privadas para real e efetivamente esclarecer e orientar a população para a convivência com as aquelas mudanças climáticas que já se tornaram inevitáveis. Não é sem razão que, inclusive, a Agenda 2030 da ONU insere os aspectos centrais sobre as mudanças climáticas como um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O Instituto de Estudos Climáticos do ES desenvolve pesquisas interdisciplinares na ampla temática de mudanças climáticas, abrangendo as seguintes Linhas de Pesquisa: modelagem do sistema climático; modelagem do sistema terrestre; cenários futuros de mudanças climáticas; observações de extremos e variabilidade climática

e estudos de atribuição de causas; impactos das mudanças climáticas nos setores de recursos hídricos, agricultura, silvicultura, biodiversidade, infraestrutura, saúde, zonas costeiras, oceanos, engenharia, energia e desastres naturais, e estudos de vulnerabilidade e adaptação; e mitigação das mudanças climáticas.

O IEC-ES é integrado por pesquisadores das áreas de climatologia, recursos hídricos e agricultura. Os principais produtos gerados até o momento incluem mapas e cenários futuros de mudanças climáticas para o ES, obtidos a partir de modelos climáticos de alta-resolução (5km), incluindo estimativas de mudança no regime de chuvas, qualidade do ar e temperatura da região com informações sobre intensidade dos períodos chuvosos, dias de estiagem, volume de precipitação e outras informações de interesse para planejamento da agricultura, da defesa civil, dos recursos hídricos e do meio ambiente. Além disso, o IEC-ES implementou e mantém a Plataforma de Dados Ambientais, que contém dados históricos de clima para o ES e projeções para os cenários futuros de mudanças climáticas. Seu objetivo é permitir que pesquisadores, gestores públicos e privados tenham acesso a informações históricas do clima do ES e projeções de mudanças climáticas futuras com base nos mais recentes estudos científicos disponíveis, incluindo dados de precipitação, umidade, temperatura e demais dados climáticos para orientar as pesquisas na área e os processos de gestão e tomada de decisão quanto às ações de preparação, prevenção e/ou de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas previstas. Os produtos gerados têm sido empregados pelo Fórum Estadual de Mudanças Climáticas para a definição das políticas estaduais de enfrentamento às mudanças climáticas.

Para maiores informações consulte [www.impactoclima.ufes.br](http://www.impactoclima.ufes.br).

*Neyval Costa Reis Junior*

Instituto de Estudos Climáticos do Espírito Santo



# INTRODUÇÃO

*Wagner Rodrigues Soares*

A mudança climática global é um tema amplamente debatido principalmente durante as duas últimas décadas. Sendo o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 (ODS 13) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) e foco de diversos estudos científicos e relatórios direcionados para tomadores de decisão como aqueles elaborados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a alteração no clima vem sinalizando que o combate ao aquecimento global requer o atingimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris de 2015, ou seja, manter o aquecimento abaixo de 2 °C e, mais ambiciosamente, abaixo de 1,5 °C, com a finalidade de reduzir maiores riscos e impactos. A temperatura média global na superfície já subiu cerca de 1,1 °C devido à ação humana e torna-se um enorme e urgente desafio a ser enfrentado em escala global e local.

Atingir tais objetivos traria diversos benefícios e seria bem menos oneroso aos governos e à sociedade que a posterior atenuação dos severos impactos caso o aquecimento global continue no ritmo atual. Algumas iniciativas regionais no combate às mudanças climáticas dependem da disposição dos tomadores de decisão no enfrentamento de um clima cada vez mais instável, com implicações para todos os setores da economia e da sociedade. Nesse sentido, a equipe de pesquisadores do Instituto de Estudos Climáticos do Espírito Santo (IEC-ES), vinculado ao Departamento de Engenharia Ambiental (DEA) da Universidade Federal do Espírito Santo, apresenta um material relativo às mudanças climáticas, abordando os seguintes tópicos:

- Conceitos para o Entendimento das Mudanças Climáticas;
- Projeções Climáticas para o Espírito Santo;
- Recursos Hídricos;
- Resiliência Urbana;
- Agricultura.

No presente livro, para cada um desses tópicos são apresentados uma visão geral, os riscos, as vulnerabilidades e os impactos de escala local à global no estado do Espírito Santo. Entre os mais diversos tópicos associados aos estudos das mudanças climáticas, os apresentados aqui são entendidos como de grande importância e relevância, podendo servir como guias acerca das mudanças climáticas. Podem, também, ser utilizados como norteadores das discussões e ações estratégicas por parte do governo, tomadores de decisão, setor privado, ONGs e demais entidades e setores sociais, como o Fórum Capixaba de Mudanças Climáticas (FCMC), de modo a alavancar políticas públicas e engajar os setores privado, educacional, acadêmico e a sociedade em geral. Esse engajamento deve ser focado na busca e implementação de soluções e de trajetórias de desenvolvimento sustentável para o estado, isto é, na construção presente e futura do “Espírito Santo Sustentável”. Adicionalmente, no capítulo 6 é feita uma revisão do estado da arte em relação às mudanças climáticas a partir dos três recentes relatórios de avaliação do IPCC-AR6 (*Sixth Assessment Report*), lançados em 2021 e 2022.

# CAPÍTULO I

## CONCEITOS BÁSICOS PARA O ENTENDIMENTO SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

*Wagner Rodrigues Soares*

### **Introdução**

A seguir serão apresentados alguns conceitos básicos para o entendimento acerca das mudanças climáticas tais como: o que é efeito estufa atmosférico, o papel do IPCC, evidências das mudanças climáticas, entre outros.

**Efeito estufa atmosférico e aquecimento global** (Ma; Tipping, 1998): o aquecimento global é atribuído ao aumento constante dos gases traços atmosféricos produzidos em grande parte pelas atividades humanas, como o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e os clorofluorcarbonetos. Esses gases são comumente chamados de “gases de efeito estufa” (GEE), porque não interagem com a maior parte da radiação solar que aquece a superfície da Terra, mas absorvem parte da radiação térmica emitida pela superfície para o espaço. Isso aumenta o fluxo de radiação térmica para a superfície e, como consequência, eleva a temperatura da superfície. O vapor de água também é um importante gás de efeito estufa natural, mas sua volatilidade, ou seja, sua capacidade de evaporar-se rapidamente e condensar-se em resposta a mudanças de temperatura, torna mais complexo seu papel. Diferentemente de como ocorre com outros gases como  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , atividades humanas pouco afetam diretamente a quantidade de vapor de água na atmosfera. Porém, o aumento da temperatura da superfície e da baixa atmosfera fazem com que o vapor de água aumente sua concentração na atmosfera, exercendo, assim, papel importante no aquecimento global. Aumentos na quantidade de

vapor de água atmosférico, em condições mais quentes, reforçam a absorção de radiação térmica pela baixa atmosfera. Por outro lado, mais nuvens tendem a se formar, as quais podem fornecer um *feedback* positivo ou negativo, capturando a radiação térmica de saída ou aumentando a quantidade de radiação solar refletida de volta ao espaço, respectivamente. Atualmente, aproximadamente 30% da radiação solar recebida é refletida de volta ao espaço pelas nuvens, aerossóis e pela superfície da Terra. Sem os GEE que ocorrem naturalmente, a temperatura média da superfície da Terra seria próxima de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vez dos  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  observados. A concentração de GEE, especialmente dióxido de carbono e metano, flutua naturalmente em escalas de tempo geológicas. Embora nem todos os mecanismos responsáveis por essas flutuações sejam totalmente claros, a temperatura da Terra respondeu a eles alternando entre a idade do gelo, associado a baixas concentrações atmosféricas de  $\text{CO}_2$  da ordem de 180 ppm; entre as condições interglaciais, com concentrações de  $\text{CO}_2$  da ordem de 280 ppm; e entre o aumento da temperatura da superfície entre  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  em relação ao pico dos períodos glaciares. Além dessas lentas variações naturais, as concentrações atmosféricas desses gases estão sendo alteradas rapidamente (em comparação à escala de tempo geológica) pelas atividades humanas à medida que queimamos combustíveis fósseis, desmatamos florestas e usamos transporte dependente de gasolina, criando o efeito estufa antropogênico. Tais emissões vem crescendo desde o início da Revolução Industrial no final do século XVIII, mas a maior taxa de crescimento é observada nos últimos 60 anos. Em março de 1958, no observatório de Mauna Loa no Havai (Global Monitoring Laboratory, s.d.) a concentração de  $\text{CO}_2$  era de 313 ppm, aumentando para 408,54 ppm em setembro de 2019 e subindo para 411,29 ppm em setembro de 2020 (ver Figuras 2 e 3).

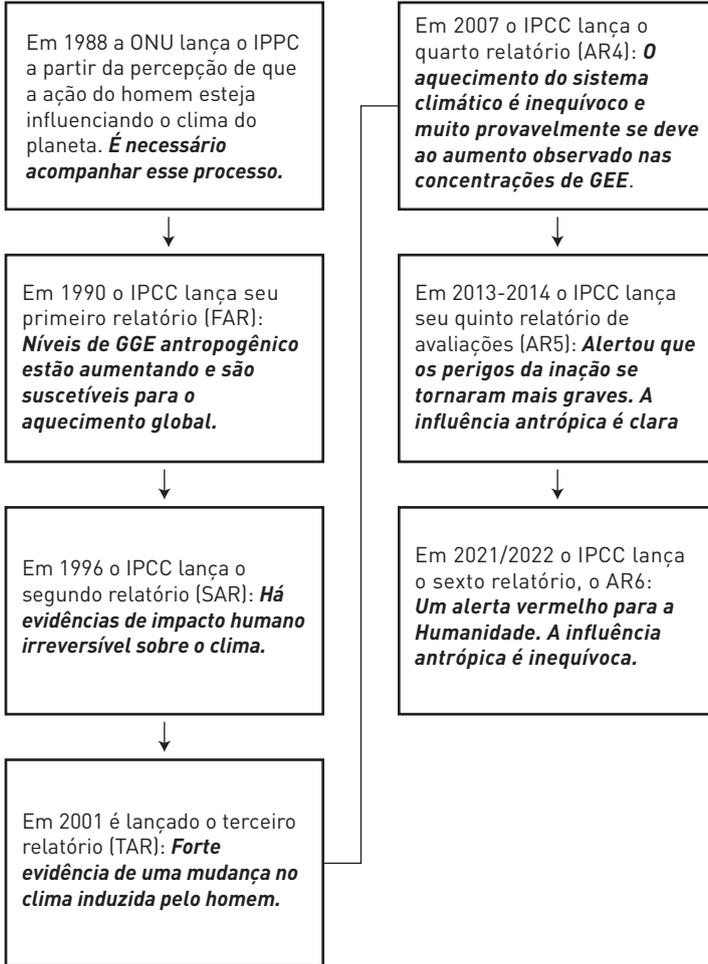
**O Acordo de Paris:** em 2015, na COP21 (Sustainable Innovation Forum, 2015), pela primeira vez 195 nações que firmaram o acordo e se comprometeram a tomar medidas para combater as

mudanças climáticas. Os principais pontos desse acordo são: conter o aumento de temperatura média global abaixo do limite de 2 °C até o final do século, mas com compromissos de conter o aumento o mais próximo possível de 1,5 °C; estabelecer metas de reduzir as emissões dos GEE; e reduzir em 70% as emissões até 2050 e reduzir a zero até o final do século, para não superar os 2 °C.

**NDC** (Nationally Determined Contributions) é a sigla em inglês para as Contribuições Nacionalmente Determinadas. NDCs são as metas e compromissos que cada país definiu no Acordo de Paris como resultado da COP21 com o objetivo de reduzir as emissões de GEE.

**Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)** (IPCC, s.d.): foi criado pela Organização das Nações Unidas em 1988 e colocado sob gestão e organização de dois órgãos da ONU: o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e a Organização Meteorológica Mundial. O objetivo do IPCC é fornecer, aos formuladores de políticas, avaliações científicas regulares sobre as mudanças climáticas, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como propor opções de adaptação e mitigação. O IPCC não gera novos conhecimentos científicos, mas faz uma revisão rigorosa e ampla de estudos e artigos publicados acerca das mudanças climáticas e incorpora em seus relatórios. O sexto relatório do IPCC, o AR6 (IPCC, s.d.) lançado em 2021 foi aprovado por 234 autores e 195 governos, sendo essa a maior atualização do estado do conhecimento sobre ciência climática desde o lançamento do AR5 do IPCC em 2013. De fato, o IPCC-AR6 contém 51.387 comentários de revisão de governos, 1.279 de especialistas em que mais de 14.000 artigos científicos foram referenciados. Uma das principais mensagens do IPCC-AR6 é que, para limitarmos o aquecimento global conforme o acordo de Paris, são necessárias reduções fortes, rápidas e sustentadas de CO<sub>2</sub>, metano e outros GGE. Isso não só reduziria as consequências das mudanças climáticas, mas também melhora a

poluição do ar nas cidades. Um resumo histórico do IPCC é apresentado na Figura 1, na qual a **emergência climática em decorrência da ação humana** fica clara com o passar do tempo.



**Figura 1. Resumo histórico das principais ações e relatórios do IPCC desde 1988**

Fonte: Elaboração própria.

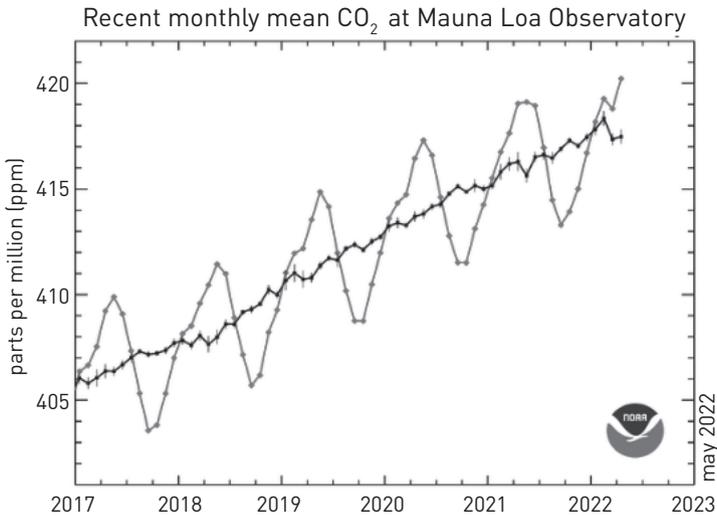
Um aspecto extremamente relevante dos trabalhos do IPCC é o **CMIP** (Coupled Model Intercomparison Project Phase *N*, ou Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase *N*) (WCRP, s.d.). O CMIP está no fim da Fase 5 (CMIP5) e os dados da fase 6 vem sendo disponibilizados desde o final de 2019 para elaboração de estudos científicos. O Brasil participa do CMIP com o Brazilian Earth System Model (BESM), desenvolvido e operado pelo Inpe (PMEL Carbon Program, s.d.). O CMIP gera os dados a partir de cenários de mudanças climáticas futuras e do clima passado (cenários paleoclimáticos) e fornece acesso às projeções de clima utilizadas em milhares de artigos e relatórios científicos, livros, teses etc. O CMIP6, atualmente, envolve mais de 50 grupos de estudos e desenvolvimento de modelagem climática.

Na organização de seus trabalhos, o CMIP desenha regularmente **cenários futuros de mudanças climáticas**. Esses cenários são representações plausíveis das emissões futuras de GEE baseadas em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes radiativas resultantes de emissões ou remoções de GEE na atmosfera e emissões ou remoções relacionadas à demografia, ao desenvolvimento socioeconômico e às mudanças tecnológicas. Grupos de estudo introduziram os **cenários RCPs** (Representative Concentration Pathways) (Riahi; Grübler; Nakicenovic, 2007; Fujino *et al.*, 2006; Hijioka *et al.*, 2008; Smith; Wigley, 2006; Van Vuuren *et al.*, 2011), que usam um sistema que levam em conta os impactos das emissões, ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação do sistema terrestre (Nakicenovic; Swart, 2000; Moss *et al.*, 2010). Esses cenários são: RCP 2.6 (baixas emissões), RCPs 4.5 e 6.0 (médias emissões) e o RCP 8.5 (altas emissões), e foram utilizados no último relatório do IPCC, o AR5 (IPCC, s.d.; IPCC, 2013). No CMIP6, além dos RCPs, são considerados os **cenários SSPs** (Shared Socio-Economic Pathways – Caminhos Socioeconômicos Compartilhados) que incluem cenários que consideram emissões negativas de CO<sub>2</sub> por meio da captura desse GEE.

**Modelo climático:** é um código computacional complexo com representações numéricas aproximadas das equações matemáticas que representam as Leis da Física, as quais governam os movimentos na atmosfera (oceanos) e as interações com a superfície. Num modelo, a atmosfera é dividida em alguns milhões de volumes discretos e, em cada um desses volumes, computa-se a temperatura, umidade do ar, vento e pressão para instantes de tempo futuros. Esses modelos fazem previsões de curto prazo, como as previsões de tempo, ou de longo prazo, como as projeções futuras de mudanças climáticas que levam em conta os cenários climáticos futuros e servem para estudos de vulnerabilidade, impactos e adaptação. Na modelagem do clima existem incertezas como limitações na representação de processos físicos poucos conhecidos e que são parametrizados. Uma das maneiras de tratar as incertezas é o desenvolvimento de modelos mais integrados, como os Modelos do Sistema Terrestre (ES-Earth System models). Estes são mais completos, incluindo desde a circulação atmosférica e oceânica, física do solo, fisiologia das plantas, biogeoquímica e profundidade do solo, até o uso da terra e de outros componentes do sistema terrestre. A confiabilidade de um modelo climático baseia-se em três pontos principais: (a) o fato de se fundamentar em leis bem estabelecidas da Física; (b) a sua capacidade de simular importantes aspectos do clima atual fazendo avaliações pela comparação dos resultados das simulações com observações da atmosfera, dos oceanos, da superfície terrestre etc.; ou através da comparação dos resultados de múltiplos modelos climáticos e (c) a sua capacidade em reproduzir características de climas e mudanças climáticas que ocorreram no passado (Randall *et al.*, 2007). Ao atender a esses três pontos, os modelos climáticos são considerados capazes de prover consistentes estimativas quantitativas de mudanças climáticas futuras com base em diferentes cenários de emissão de GEE.

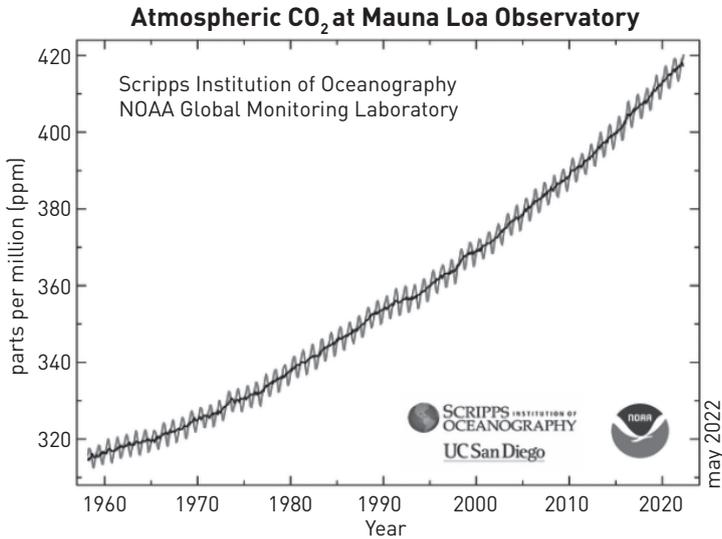
**O aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub>** medido no observatório Mauna Loa, no Havaí (Global Monitoring Laboratory, s.d.) é

mostrado nas figuras 2 e 3. Os dados de dióxido de carbono (curva vermelha), medidos como a fração molar no ar seco, em Mauna Loa constituem o registro mais longo de medições diretas de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. O valor observado em abril de 2021 foi de 419.05 ppm, subindo para 420.23 ppm durante abril de 2022 (Figura 2), valores bem acima dos 350 ppm necessários para se atingir o objetivo mais ambicioso da COP21 (Sustainable Innovation Forum, 2015) de manter o aquecimento global abaixo de 1.5 °C. A Figura 3 mostra o aumento na concentração a partir de meados de 1958 até setembro de 2020. Essa figura mostra o registro mais longo de medições diretas de  $\text{CO}_2$  na atmosfera terrestre.



**Figura 2. Médias das concentrações de  $\text{CO}_2$  desde 2017 até abril de 2022 medidos no observatório de Mauna Loa, Haváí**

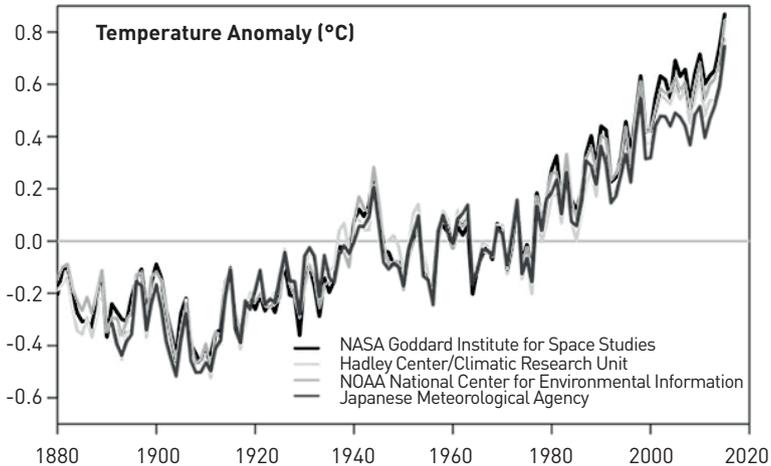
Fonte: Global Monitoring Laboratory (s.d.).



**Figura 3. Concentração de CO<sub>2</sub> a partir de meados de 1958 durante o Primeiro Ano Internacional Geofísico até setembro de 2022. Os dados de CO<sub>2</sub> (curva vermelha), medidos como a fração molar do ar seco, no observatório de Mauna Loa, no Havaí, constituem o registro mais longo de medições diretas de CO<sub>2</sub> na atmosfera**  
Fonte: Global Monitoring Laboratory (s.d.).

Uma das **Evidências das Mudanças Climáticas** é o **aumento da temperatura média da superfície do planeta**, que subiu cerca de 1 °C desde o final do século XIX. Essa mudança é causada, principalmente, pelo aumento do dióxido de carbono e outras emissões antropogênicas na atmosfera. A maior parte do aquecimento ocorreu desde meados da década de 1960, mais aceleradamente a partir dos anos 1980, e com os cinco anos mais quentes registrados desde 2010. Não somente 2016 foi o ano mais quente já registrado, mas oito dos 12 meses que compõem o ano – de janeiro a setembro, com exceção de junho – foram os mais quentes registrados nos respectivos meses. A Figura 4 agrega dados de temperatura analisados por quatro instituições

para mostrar o aquecimento rápido nas últimas décadas, com a última década sendo a mais quente já registrada (Gross, 2018). Existe um consenso científico de que as mudanças climáticas são reais e que as ações humanas são as responsáveis pela maior parte dessas mudanças (IPCC, s.d.; Nasa, s.d.).



**Figura 4. Anomalia de temperatura observada a partir de quatro fontes de dados observados**

Fonte: Gross (2018).

Além do aumento da temperatura mostrado na Figura 4, existem outras evidências das mudanças climáticas (Nasa, 2017). Algumas delas são destacadas resumidamente a seguir:

**Recuo de geleiras** (NSIDC, s.d.): as geleiras estão recuando em quase todo o mundo, inclusive nos Alpes, Himalaia, Andes, Montanhas Rochosas, Alasca e África. **Cobertura de neve diminuindo** (NSIDC, s.d.): observações de satélite revelam que a quantidade de cobertura de neve na primavera no Hemisfério Norte diminuiu nas últimas cinco décadas e que a neve está derretendo mais cedo.

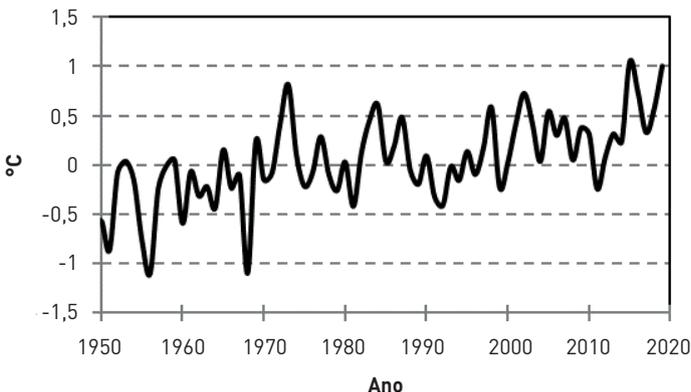
**Elevação do nível do mar** (Nerem *et al.*, 2018): o **nível do mar global já subiu cerca de 25 cm**. Nas últimas duas décadas, no

entanto, a taxa **é quase o dobro** daquela do século passado, e está acelerando ligeiramente a cada ano.

**Gelo do Oceano Ártico em declínio** (Serreze; Meier, 2019): tanto a extensão quanto a espessura do gelo marinho do Oceano Ártico diminuíram rapidamente nas últimas décadas.

**Acidificação dos oceanos** (PMEL Carbon Program, s.d.): desde o início da Revolução Industrial, a acidez das águas oceânicas superficiais aumentou em cerca de 30%. Esse aumento é o resultado de ações humanas que emitem mais dióxido de carbono na atmosfera e, portanto, será mais absorvido pelos oceanos. A quantidade de dióxido de carbono absorvida pela camada superior dos oceanos está aumentando em cerca de 2 bilhões de toneladas por ano.

**O aumento da temperatura média no Brasil** é mostrado na Figura 5, que apresenta a série temporal de anomalias de temperatura a partir do conjunto de dados de reanálises do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) do PSL (Physical Sciences Laboratory) (PSL, s.d.). Nos últimos anos da série, a anomalia de temperatura chega a 1 °C em relação ao período de 1961 até 1990, evidenciando, dessa forma, o aquecimento observado.

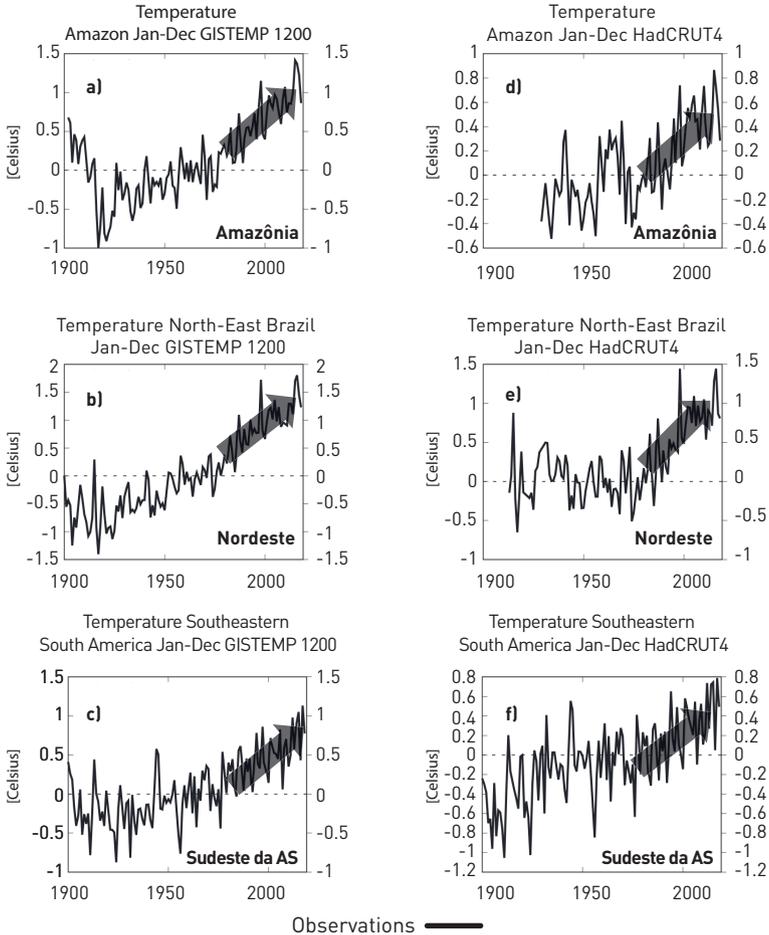


**Figura 5. Séries temporais de anomalia de temperatura das reanálises do NCEP para o Brasil**

Fonte: Elaborada pelo autor com dados disponibilizados pela WMO (s.d.).

A Figura 6 mostra o **aquecimento observado em três regiões do Brasil**. Os dados são do GISTEMP1200 (Nasa, s.d.) e do HadCRU4 (Climatic Research Unit, s.d.), e as séries temporais foram obtidas no KNMI Climate Change Atlas (WMO, s.d.). As setas vermelhas apontam para anomalias de temperatura que ultrapassam 1 °C, principalmente na última década.

**Mudanças Climáticas, Desastres Naturais e Eventos Extremos Climáticos:** o relatório “2020 Estado de Serviços de Clima - Informações de Riscos e Sistemas de Aviso Prévio” (2020 State of Climate Services - Risk Information and Early Warning Systems), da Organização Meteorológica Mundial (OMM - no inglês, World Meteorological Organization - WMO) (WMO, 2020) mostra que os Desastres Naturais cresceram 5 vezes nos últimos 50 anos. Nesse período, foram dois milhões de mortes e perdas avaliadas em US\$ 3,6 trilhões. O número de eventos extremos climáticos tem aumentado em frequência e intensidade em todo o planeta em decorrência das mudanças climáticas. Em 2019, aproximadamente 108 milhões de pessoas no mundo procuraram ajuda do sistema humanitário internacional devido a desastres naturais como tempestades severas, inundações, secas e incêndios. Até 2030, é estimado que esse número possa aumentar quase 50%, a um custo de cerca de US\$ 20 bilhões (R\$ 110,6 bilhões) por ano, segundo a OMM.



**Figura 6. Séries temporais de anomalia de temperatura para regiões do Brasil. a, b, c para o conjunto de dados GISTEMP1200; d, e, f para o conjunto de dados HadCRUT4**

Fonte: Elaboração própria.

Os impactos das mudanças climáticas associados aos eventos extremos climáticos incluem uma atmosfera mais instável, tempestades mais fortes, alagamentos, deslizamentos, ondas de calor, secas prolongadas, aumento do nível do mar e ruptura generalizada da infraestrutura e dos

padrões de migração. Os riscos associados a alguns tipos de eventos extremos (por exemplo, calor extremo) aumentam ainda mais com temperaturas mais elevadas. Fischer e Knutti (2015) estimam qual fração da ocorrência de fortes precipitações e extremos de calor são atribuídos ao aquecimento. Os autores mostram que, nos 0,85 °C de aquecimento dos dias atuais, cerca de 18% de precipitações extremas que ocorrem sobre o continente são atribuídas ao incremento de temperatura desde o período pré-industrial, que, por sua vez, resulta da influência humana. Um exemplo de evento extremo recente é o Ciclone Nargis (Nasa, s.d.), que em 2008 causou mais de 10.000 mortes. Esse ciclone passou pela Birmânia, Mianmar, após se formar na Baía de Bengala. Ele chegou à categoria 4, com ventos sustentados de 210km/h, de acordo com o Earth Observatory da Nasa (Nasa, 2008).

**Desastres naturais no Brasil**, como o ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro em 2011, assumiram contorno catastrófico devido à conjugação de fatores sabidamente associados à geração de risco de acidentes naturais. A topografia, a geologia, a hidrografia e o regime pluviométrico da região determinam a previsibilidade da ocorrência de acidentes naturais na área, fenômenos diretamente associados com a evolução e moldagem da paisagem. Nessas condições, a suscetibilidade a escorregamentos associados à instabilidade de encostas é bastante evidente, e a ocupação dessas encostas e áreas adjacentes torna os desastres naturais eventos catastrófico devido à proporção de vítimas e danos socioeconômicos de elevada monta.

O distrito de Bonsucesso, localizado na zona rural do município de Teresópolis, foi severamente afetado. Somente nesse local, ocorreram 40 mortes e a destruição de pontes, estradas, casas e outras construções utilizadas na agropecuária, resultando também em grandes prejuízos econômicos (Brasil, s.d.). Outro exemplo recente de desastre natural no Brasil foi o Ciclone Bomba (Souza, 2020; Sampaio, 2020) em Santa Catarina, ocorrido em 30 de junho de 2020. Esse evento foi considerado o maior desastre com ventos da história de Santa Catarina, superando até os estragos causados pelo furacão Catarina, em 2004. O evento extremo se formou devido à queda de pressão

bastante significativa em 24 horas. A pressão atmosférica caiu exatamente 24 hPa de um dia para o outro, queda de 1020 hPa para 996 hPa, situação rara. Os ventos chegaram a 120 km/h. Na cidade de Governador Celso Ramos, 80% das construções sofreram algum tipo de dano (cerca de 3 mil imóveis), e o ginásio de esportes desabou. Foram registrados 57 desabrigados, 302 desalojados, 12 mortes e os prejuízos foram estimados em R\$ 277 milhões.

De fato, o Brasil testemunhou nos últimos 10 anos diversos extremos climáticos caracterizados, no momento em que aconteceram, como “eventos do século”: secas em 2005 e 2010, e enchentes em 2009, 2013 e 2014 na Amazônia; seca no semiárido do Nordeste desde 2012, se estendendo até 2015; e a seca no Sudeste do Brasil de 2014-2015, que gerou a pior crise de água na cidade de São Paulo desde 1960. Ondas de calor também têm afetado todo o Brasil, e o inverno de 2015 foi até 3-4 °C acima do normal. Também se tem observado um aumento nos extremos de chuva no Sudeste e Sul do Brasil, afetando áreas vulneráveis em cidades nessas regiões e acrescentando o risco de enchentes, alagamento e deslizamentos de terra em áreas urbanas e rurais, assim como secas em regiões como a Amazônia e o Centro-Oeste têm aumentado o risco de queimadas e incêndios florestais. Durante a primeira semana de outubro de 2020, a cidade de São Paulo registrou temperaturas que ultrapassaram 37 °C devido a uma onda de calor que atingiu o Sudeste e o Centro-Oeste do Brasil com quebras de recordes consecutivas. Segundo a notícia no site GZH (Girardi, 2020), dias de calor extremo em São Paulo estão mais frequentes.

No período de 30 anos entre 1960 e 1990, um terço dos meses de setembro e de outubro teve mais do que três dias com extremos de temperatura (igual ou maior que 31,1 °C para setembro, e igual ou maior que 32 °C para outubro). Nos últimos 20 anos, metade dos meses de setembro e de outubro apresentaram mais do que três dias nessas condições. Ainda, segundo o site, outro levantamento feito pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) aponta que, no mês de outubro, as dez maiores temperaturas

registradas para o mês na estação do Mirante de Santana, onde a medição começou a ser feita em 1943, ocorreram a partir de 2012 na capital. O valor mais alto – e também o recorde histórico geral para a capital – é de 17 de outubro de 2014, com 37,8 °C. Os três seguintes foram registrados neste ano (37,4 °C no dia 2; 37,3 °C no dia 7; e 37,1 °C, dia 1º de outubro de 2020).

**Desastres Naturais ocorridos no Espírito Santo** na última década causaram perdas de vidas e grandes perdas econômicas. Com as fortes chuvas que ocorreram em dezembro de 2013, o site de notícias A Gazeta (G1 ES, 2013) destacou que a Defesa Civil contabilizou 23 mortes, 52 municípios do estado afetados e mais de 61 mil pessoas atingidas no estado. A seca de 2015 também foi um evento extremo que causou dificuldades na cidade de Colatina, segundo noticiado pela Gazeta (G1 ES, s.d.). De acordo com a notícia, o município de Colatina, no Noroeste do estado, decretou situação de emergência na zona rural devido à falta de chuvas. O córrego São João Pequeno ficou completamente seco, e mais de 400 propriedades da região foram prejudicadas. Ainda mais recentemente, em 2019 e 2020, há outros exemplos de eventos extremos de falta ou excesso de chuvas no Espírito Santo: em 2019, a seca no estado deixou 16 municípios em alerta pela falta de chuva e cerca de 400 mil capixabas vivem em áreas onde as reservas de água estavam em baixa de acordo com uma notícia divulgada pela A Gazeta (s.d.). Ainda, segundo esse mesmo site de notícias (2019), devido às chuvas fortes ocorridas em novembro de 2019, Vila Velha suspendeu aulas em 40 escolas e a lagoa de Carapebus transbordou. Em Cariacica, um deslizamento deixou 3 feridos. A cidade de Santa Leopoldina também sofreu alagamentos, e a ES80, que dá acesso ao município, foi interditada. Já a BR-101 foi interditada em Viana. Em Vitória, a precipitação registrada foi de 200mm em 24 horas. No final de janeiro de 2020, o site G1 (2020) destacou que mais de 12 mil pessoas ficaram fora de suas casas em 27 municípios do Espírito Santo, pois estes foram atingidos pelas chuvas iniciadas em 17 de janeiro. Além disso, nove pessoas morreram, incluindo duas crianças.

Ainda mais recentemente as chuvas incessantes em dezembro de 2022 causaram enormes prejuízos sociais e econômicos em todo Estado. A seguir são destacados alguns eventos reportados pela mídia Capixaba.

No dia 2 de dezembro ocorreram alagamentos e deslizamentos no Norte do estado principalmente em Linhares, Colatina, Rio Bananal e João Neiva, com 133 pessoas desabrigadas (Lara Mireny, A Gazeta, 2022a, s.d.). No dia 4 as fortes chuvas fizeram mais de 4 mil pessoas começarem a semana fora de casa. O Rio Doce, principal afluente da Região Norte, em Linhares ultrapassou a cota de alerta. Em Ibirapu choveu 74.81 mm em 24 horas. (Vinicius Zagoto, A Gazeta, 2022b, s.d.). No dia 13, a chuva que durou cerca de duas horas, alagou vias e trechos em Marataízes no Sul do estado (Lara Mireny, A Gazeta, 2022c, s.d.). No dia 14, a chuva forte deixou ruas inundadas em cidades do Norte e Noroeste do estado. As cidades que tiveram maior volume de chuva em 24h foram Conceição da Barra e São Mateus com volume de chuva perto de 100 mm causando inundações (Vinicius Lodi, A Gazeta, 2022d, s.d.). No dia 18, uma barreira cedeu e atingiu casas em São Mateus, no Norte do Espírito Santo. O local já havia sido interditado desde novembro pela Defesa Civil Municipal devido ao risco de deslizamento. Cerca de 50 famílias da região precisaram sair de casa. São Mateus decretou estado de calamidade pública devido a chuva que atingiu o município (Viviane Maciel, A Gazeta, 2022e, s.d.).

Vitória foi a capital brasileira onde mais choveu durante os meses de primavera, segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) levantados pelo Climatempo. A capital capixaba teve a primavera mais chuvosa dos últimos nove anos, registrando praticamente o dobro da média esperada para a estação. Vitória recebeu 839 mm de chuva na primavera, o dobro da média registrada nos últimos 30 anos. Belo Horizonte, em Minas Gerais, ficou logo atrás com 833 mm de chuva (Redação, A Gazeta, 2022f, s.d.).

Devido às fortes chuvas ocorridas no período o Estado recebeu vários alertas de tempo severo e órgãos dos governos municipais e

do estado como a Defesa Civil, realizaram ações de resposta aos desastres. Além disso, foram realizadas campanhas solidárias em várias cidades para auxiliar as famílias atingidas.

Esses eventos registrados aumentam a preocupação com desastres, visto que há maior possibilidade de que esses tipos de episódios extremos sejam mais frequentes e/ou intensos num clima mais quente no futuro, de acordo com simulações e projeções dos modelos climáticos nos relatórios do IPCC-AR5 (IPCC, s.d.; IPCC, 2013; IPCC, 2014).

No Espírito Santo o principal fenômeno climático que causa chuvas é a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) principalmente na primavera e verão. A ZCAS é um corredor de umidade oriundo da região Amazônica que passa sobre o Estado, interage com outros fenômenos, por ex. a passagem de uma frente fria no litoral, causando instabilidade na atmosfera e chuva.

**Impactos das Mudanças Climáticas no Brasil:** em 2010, os ministérios de Ciência, Tecnologia e Inovação e o de Meio Ambiente criaram o **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC)** (PBMC, s.d.). Trata-se de um organismo científico nacional que tem como objetivo reunir, sintetizar e avaliar informações científicas sobre os aspectos relevantes das mudanças climáticas no Brasil a partir da publicação de relatórios de avaliação nacional. Na linha de cooperação internacional e capacitação, o PBMC compartilha métodos, resultados e conhecimentos com países em desenvolvimento, ajudando a fortalecer as suas capacidades nacionais de respostas à mudança climática.

A partir do relatório ***Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação*** (PBMC, 2014) do PBMC, cenários regionalizados de clima futuro para o Brasil no século XXI apontam como impactos principais: perdas nos ecossistemas e biodiversidade na região Norte, principalmente na Amazônia, mais eventos extremos de chuva e secas e condições favoráveis para a ocorrência de **mais queimadas**. **Já na região Sul, mais eventos intensos de chuva são previstos, assim como o aumento na frequência de noites quentes**, altas temperaturas e variabilidade de chuvas, afetando a agricultura. Na região

Nordeste, são esperados mais veranicos, maior tendência para aridização, maior escassez de água e alta taxa de evaporação, afetando o nível dos açudes e a agricultura de subsistência. Por sua vez, a região Centro-oeste pode sofrer impactos no Pantanal e no Cerrado, com maior risco de fogo, além de vivenciar mais eventos extremos de chuva e seca, maior taxa de evaporação, veranicos com ondas de calor e repercussões na saúde, na agricultura e na geração de hidroenergia. Por fim, a região Sudeste sofrerá com mais eventos extremos de chuva e secas, com implicações na saúde, na agricultura, na geração de hidroenergia e com a elevação do nível do mar.

## Referências

A GAZETA. **Acompanhe os reflexos da chuva na Grande Vitória.** 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3zD45BR>. Acesso em: 30 jan. 2023.

A GAZETA. **Barreira cede e atinge casas interditadas em São Mateus.** 2022e. Disponível em: <https://bit.ly/3OutCFb>. Acesso em: 19 dez. 2022.

A GAZETA. **Chuva faz mais de 4 mil pessoas começarem a semana fora de casa no ES.** 2022b. Disponível em: <https://bit.ly/3qcN000>. Acesso em: 5 dez. 2022.

A GAZETA. **Chuva forte deixa ruas inundadas em cidades do Norte e Noroeste do ES.** 2022d. Disponível em: <https://bit.ly/3DEUMmp>. Acesso em: 14 dez. 2022.

A GAZETA. **Chuvas incessantes causam alagamentos em ruas e casas no Norte do ES.** 2022a. Disponível em: <https://bit.ly/3QdM5qL>. Acesso em: 2 dez. 2022.

A GAZETA. **Seca no ES: 16 municípios em alerta por falta de chuvas.** Disponível em: <https://bit.ly/3pQNW9U>. Acesso em: 30 jan. 2023.

A GAZETA. **Temporal “transforma” ruas em rios em Marataízes.** 2022c. Disponível em: <https://bit.ly/3QfrEd0>. Acesso em: 13 dez. 2022.

A GAZETA. **Vila Velha suspende aulas em 40 escolas por causa de alagamentos.** 2019b. Disponível em: <https://bit.ly/4761W0L>. Acesso em: 13 nov. 2019.

A GAZETA. **Vitória foi a capital do país onde mais choveu na primavera de 2022**. 2022f. Disponível em: <https://bit.ly/45nLE1J>. Acesso em: 23 dez. 2022.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <https://bit.ly/3DRbD6I>. Acesso em: 30 jan. 2023.

CLIMATIC RESEARCH UNIT: DATA. **Temperature**. Disponível em: <https://bit.ly/3mNmiVQ>. Acesso em: 30 jan. 2023.

DA SILVA, C. M. R. **Impactos ambientais: importância da preservação do fundo de vale da cidade de Teresópolis – RJ 2012**. Universidade Federal do Paraná, 28p. 2012.

ESA. **European Space Agency**. Disponível em: <https://bit.ly/3TXvt5F>. Acesso em: 06 jan. 2021.

FISCHER, Erich M.; KNUTTI, Reto. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. **Nature Climate Change**, 2015.

FOLHA DE S. PAULO. **Sobe para 16 número de mortes após temporal no Rio de Janeiro**. 2022. Disponível em: <https://bit.ly/44M2zLc>. Acesso em: 2 abr. 2022.

FUJINO, Junichi *et al.* Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. **The Energy Journal**, v. 27, n. especial, p. 343-353, 2006.

G1 ES. **Chuva deixa mais de 12 mil pessoas fora de casa no ES em 27 municípios**. 2020. Disponível em: <http://glo.bo/3FBlvmm>. Acesso em: 13 out. 2020.

G1 ES. **Colatina decreta situação de emergência por causa da seca, no ES**. Disponível em: <http://glo.bo/3sOcsGV>. Acesso em: 13 out. 2020.

G1 ES. **Com rodovia alagada, faixas da BR-101 são interditadas em Viana**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/44FpQOW>. Acesso em: 19 nov. 2019.

G1 ES. **Defesa Civil contabiliza 23 mortes em decorrência da chuva no ES**. 2013. Disponível em: <http://glo.bo/3zuNXcf>. Acesso em: 13 out. 2020.

GIRARDI, Giovana. Com aquecimento global, dias de calor extremo em SP estão mais frequentes. **GZH Geral**, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3h2jmWh>. Acesso em: 13 out. 2020.

G1 PE. **Tragédia provocada por chuvas e deslizamento de barreiras é o maior desastre de Pernambuco do século 21, dizem especialistas.** 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3qa45I6>. Acesso em: 30 maio 2022.

G1 PETRÓPOLIS. **Tragédia em Petrópolis chega a 233 mortos; há quatro desaparecidos.** 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3q7OnNI>. Acesso em: 4 mar. 2022.

G1 SP. **Chuvas deixam 19 mortos, fazem rios transbordarem e alagam cidades no estado de São Paulo.** 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3Yc0aqG>. Acesso em: 30 jan. 2022.

GLOBAL MONITORING LABORATORY. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.** Disponível em: <https://bit.ly/3DrkaMa>. Acesso em: 30 jan. 2023.

GROSS, Liza. Confronting climate change in the age of denial. **PLOS Biology**, v. 16, n. 10, p. e3000033, 2018.

HIJIOKA, Yasuaki *et al.* Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. **Journal of Global Environmental Engineering**, v. 13, p. 97-108, 2008.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007, Summary for Policymakers, 2007a.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change **Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report Climate Change 2007, Summary for Policymakers, 2007b.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014.** Disponível em: <https://bit.ly/3TYL2Ks>. Acesso em: 30 jan. 2023.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6. **Sixth Assessment Report.** Disponível em: <https://bit.ly/3TXt7nl>. Acesso em: 30 jan. 2023.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001: the scientific basis.** Contribution of working group 1 to the Third IPCC scientific assessment. [Houghton, J. T. *et al.* (eds.)]. Cambridge: Univ. Press, Cambridge, 2001.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4)** of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007, Summary for Policymakers, 2007a.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report (AR4)** Climate Change 2007, Summary for Policymakers, 2007b.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** Disponível em: <http://bit.ly/2FMmMGP>. Acesso em: 15 out. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **FAR Climate Change: Scientific Assessment of Climate Change.** Cambridge, UK, 1990. Disponível em: <https://bit.ly/3PMpwcg>. Acesso em: 16 abr. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK and New York, USA, 2013.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **SAR Climate Change 1995: Synthesis Report.** Disponível em: <https://bit.ly/3Ps8WNs>. Acesso em: 16 abr. 2020.

MA, Qiancheng; TIPPING, Richard H. The distribution of density matrices over potential-energy surfaces: Application to the calculation of the far-wing line shapes for CO<sub>2</sub>. **J. Chem. Phys.**, v. 108, p. 3386-3399, 1998.

MOSS, Richard H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010.

NAKICENOVIC, Nebojsa; SWART, Robert. **Special report on emissions scenarios.** Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000, v. 1, p. 612.

NASA. Earth Observatory. **Cyclone Nargis.** 2008. Disponível em: <https://bit.ly/3ETZxJq>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NASA. Earth Observatory. **Natural Event.** s.d. Disponível em: <https://bit.ly/3rtAmKI>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Goddard Institute for Space Studies. **NASA, NOAA Data Show 2016 Warmest Year on**

**Record Globally.** 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3LAK9pf>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Goddard Institute for Space Studies. **GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP v4).** Disponível em: <https://bit.ly/41NvtbB>. Acesso em: 10 fev. 2023.

NASA. **Scientific Consensus:** Earth's climate is warming. Disponível em: <https://bit.ly/3ELGi50>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NEREM, Robert Steven *et al.* Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. **PNAS**, v. 115, n. 9, p. 2022-2025, 2018.

NSIDC. National Snow and Ice Data Center. **Learn.** Disponível em: <https://bit.ly/3gP9OOn>. Acesso em: 10 fev. 2023.

NSIDC. National Snow and Ice Data Center. **Learn.** Disponível em: <https://bit.ly/3SP32FT>. Acesso em: 10 fev. 2023.

PBMC, 2014: Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E. D.; Magalhães, A. R. (eds.)]. Rio de Janeiro: COPPE; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Home.** Disponível em: <https://bit.ly/3DSzTp4>. Acesso em: 10 fev. 2023.

PMEL. Carbon Program. **Ocean Acidification.** Disponível em: <https://bit.ly/3TaG78d>. Acesso em: 10 fev. 2023.

PSL. **Physical Sciences Laboratory.** Disponível em: <https://bit.ly/3reOOq8>. Acesso em: 20 out. 2021.

PMEL Carbon Program. **What is Ocean Acidification?** Disponível em: <https://bit.ly/3DS30c7>. Acesso em: 10 fev. 2023.

RANDALL, David A. *et al.* Climate models and their evaluation. *In:* SOLOMON, Susan *et al.* (eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; New York: United Kingdom, 2007.

RIAHY, Keywan; GRÜBLER, Arnulf; NAKICENOVIC, Nebojsa. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under

climate stabilization. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 887-935, 2007.

SAMPAIO, Amanda. Ciclone bomba se forma e provoca ventania no Sul e Sudeste. **Climatempo**, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3DR9JTU>. Acesso em: 06 jan. 2023.

SERREZE, Mark C.; MEIER, Walter N. The Arctic's Sea ice cover: trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 36-53, 2019.

SMITH, Steven J.; WIGLEY, Tom M. L. Multi-gas forcing stabilization with Minicam. **The Energy Journal**, v. 27, n. especial, p. 373-391, 2006.

SOUZA, Maisa Pereira de. “Ciclone bomba”: fenômeno atingiu p Sul do Brasil no início da semana. **INMET**, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3UelqsF>. Acesso em: 06 jan. 2023.

SUSTAINABLE INNOVATION FORUM 2015. **Find out more about COP21**. Disponível em: <https://bit.ly/3sLGzPi>. Acesso em: 06 jan. 2023.

UOL. Universo Online. **Novo temporal em Petrópolis deixa 5 mortos**: chuva superou previsão de março. 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3DRSVuZ>. Acesso em: 22 mar. 2022.

VAN VUUREN, Detlef P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.

WCRP. World Climate Research Programme. **WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)**. Disponível em: <https://bit.ly/3ft3PhR>. Acesso em: 06 jan. 2023.

WMO. World Meteorological Organization. **KNMI Climate Change Atlas**. Disponível em: <https://bit.ly/3gYH8mc>. Acesso em: 06 jan. 2023.

WMO. **World Meteorological Organization**. State of Climate Services 2020 Report: Move from Early Warnings to Early Action, 2020.



## CAPÍTULO 2

# PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA O ESPÍRITO SANTO

*Wagner Rodrigues Soares*

### **Introdução**

A possibilidade de que eventos climáticos extremos sejam mais frequentes e/ou intensos num clima de aquecimento global no futuro tem sido demonstrada pelas projeções dos modelos computacionais dos sistemas terrestres/climáticos nos relatórios recentes do IPCC, como o AR5 (IPCC, 2013; 2014). Resultados de diversas publicações e experimentos numéricos de modelos computacionais dos sistemas terrestres/climáticos globais e regionais indicam que aumentarão a frequência e a intensidade de chuvas extremas em regiões do Brasil com diferentes impactos e padrões (Marengo *et al.*, 2009; Marengo *et al.*, 2010; Marengo *et al.*, 2012; Marengo; Valverde; Obregon, 2013; Marengo *et al.*, 2013). As grandes secas de 2005 e 2010 na Amazônia (Flato *et al.*, 2013), as inundações de 2012 (Marengo; Valverde; Obregon, 2013; Lewis *et al.*, 2011) e 2014 na Amazônia (Espinosa *et al.*, 2013) e a estiagem no Sudeste do Brasil ocorrida em 2014/2015 (Espinosa *et al.*, 2014) são exemplos de eventos extremos que tiveram repercussão na comunidade acadêmica, nos tomadores de decisão e na mídia.

Segundo o relatório 2020 State of Climate Services - Risk Information and Early Warning Systems (Inpe, s.d.), da WMO, aproximadamente 108 milhões de pessoas no mundo procuraram ajuda do sistema humanitário internacional devido a desastres naturais como tempestades severas, inundações, secas e incêndios ocorridos em 2019. Os Desastres Naturais cresceram 5 vezes nos últimos 50 anos e, nesse período, foram dois milhões de mortes e perdas avaliadas em US\$ 3,6 trilhões. Até 2030, é estimado que esse número

aumente quase 50% a um custo de cerca de US\$ 20 bilhões (R\$ 110,6 bilhões) por ano. Entre 1970 e 2019, 79% dos desastres em todo o mundo envolveram riscos relacionados à situação de tempo severo, riscos hidrológicos e riscos associados ao clima extremo. Esse tipo de desastre natural foi responsável por 56% das mortes e 75% das perdas econômicas associadas a eventos de desastres naturais. Nos últimos 10 anos (2010-2019), essa porcentagem aumentou 9% em comparação com a década anterior, e quase 14% em relação à década 1991-2000. A situação é particularmente aguda nos Pequenos Estados Insulares que, desde 1970 perderam US\$ 153 bilhões devido a riscos climáticos e hídricos – uma quantia significativa, dado que o produto interno bruto (PIB) médio para esses países é de US \$ 13,7 bilhões. Os países menos desenvolvidos também foram os mais afetados, visto que 1,4 milhão de pessoas (70% do total de mortes) perderam suas vidas devido a riscos climáticos e hidrológicos (Inpe, s.d.). Como as mudanças climáticas continuam a ameaçar vidas humanas, ecossistemas e economias, informações sobre riscos são, cada vez mais, necessários para reduzir os impactos relacionados aos desastres naturais em virtude dos eventos extremos climáticos como aqueles destacados em nível nacional e em particular no Espírito Santo, no início desse material.

Nesse tópico, são avaliados os impactos das mudanças climáticas no clima futuro no Espírito Santo. A avaliação é feita para a temperatura média e chuva acumulada mensal e para os índices de extremos climáticos TX90p (baseado na temperatura) e CDD (baseado na chuva), conforme detalhado na Tabela 1. Como exemplo de análise local, o CDD foi avaliado para a cidade de Montanha-ES.

## **1. Metodologia**

### ***1.1 Cenários e modelos de climáticos utilizados***

As projeções de mudanças climáticas são geradas por simulações a partir de modelos numéricos considerando diferentes cenários de

emissão de gases de efeito estufa (GEE) e de desenvolvimento socioeconômico. Cenários climáticos futuros são representações plausíveis das respostas do sistema terrestre/climático às emissões futuras de substâncias ativas do ponto de vista radiativo dos GEE.

O IPCC-AR5 de 2013 introduziu os novos cenários RCPs, que levam em conta os impactos das emissões, ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre. Os RCPs são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em  $W/m^2$ , a ser atingida durante ou próximo ao final do século XXI. Cada RCP provê conjuntos de dados, especialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar, e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100 (Haylock *et al.*, 2006). Os RCPs foram desenvolvidos por um grupo de modelos de avaliação integrada (IAM) e, para cada cenário, se pesquisou e criou conjuntos de dados de síntese a partir de estudos representativos disponíveis, que foram revistos por diferentes partes interessadas repetidamente. As projeções dos RCPs fazem parte do conjunto de simulações do CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (Taylor; Stouffer; Meehl, 2012). Cada projeção climática para diferentes cenários de RCP provê conjuntos de dados, especialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar e especifica as concentrações anuais de GEE e as emissões antropogênicas até o ano 2100 (Haylock *et al.*, 2006). Os resultados mostrados aqui foram baseados nos cenários RCPs 4.5 (cenário de estabilização de médias emissões de GEE) e RCP 8.5 (cenário com emissões muito altas de GEE) (IPCC, 2013). A seguir, são mostradas as características primárias dos cenários RCPs utilizados.

O **RCP 4.5** foi desenvolvido pela equipe de modelagem do JG-CRI (Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute), dos EUA. É um cenário de estabilização em que a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível alto do longo termo do forçamento radiativo (Miller *et al.*, 2014; Clarke *et al.*, 2007). Já o **RCP 8.5** foi desenvolvido usando

o modelo MESSAGE e pelo quadro de avaliação integrada do IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), da Áustria. Esse RCP considera um horizonte pessimista, caracterizado pelo aumento das emissões de gases estufa ao longo do tempo, representando cenários da literatura que levam a altos níveis de concentrações de GEE (Burkett *et al.*, 2014; Sanderson; Hemming; Betts, 2011).

Para se calcular as anomalias – diferença entre um cenário futuro em relação ao período histórico ou período base – são utilizados *timeslices* (fatias no tempo). O período histórico ou período base é a média entre 1961 e 1990, o *timeslice* 2020S é a média entre 2011 e 2030, 2050S é a média entre 2041 e 2070 e o *timeslice* 2080S é a média entre 2071 e 2100. A partir de mapas de anomalias é possível apontar regiões com maior risco aos desastres naturais na forma de extremos de clima.

A principal ferramenta para avaliar as variabilidades e mudanças climáticas são os experimentos numéricos utilizando Modelos Climáticos Globais (MCGs) e Modelos Climáticos Regionais (MCRs). Esses modelos são capazes de representar as complexas interações entre o oceano, a atmosfera e a superfície terrestre. Para a obtenção dos resultados desse estudo foram utilizados modelos globais e o modelo regional Eta-CPTEC com 5km de resolução espacial (Chou *et al.*, 2014b) aninhado ao modelo global HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System) (Moss *et al.*, 2010; Collins *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2011). Também foi utilizado o conjunto de experimentos numéricos do modelo regional Eta-CPTEC (Moss *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b; WMO, 2020) com resolução espacial de 20 km para o cenário RCP 8.5 (altas emissões de GGE), que contém 4 experimentos obtidos a partir do aninhamento desse modelo regional aos modelos globais HadGen2-ES, MIROC5, CANESM2-ES e BESM.

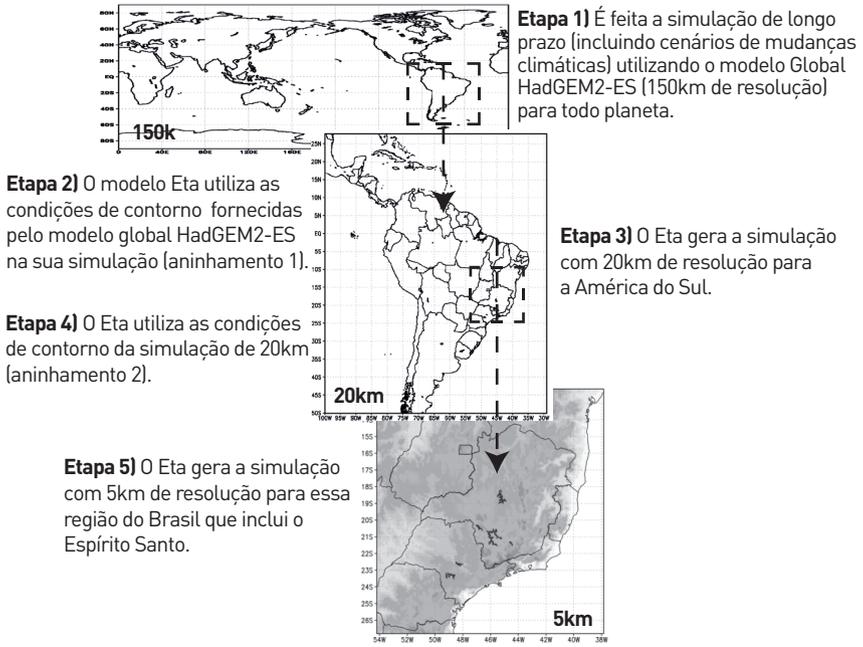
### ***1.2 Downscaling com o modelo regional Eta em alta resolução (5 km)***

O HadGEM2-ES possui resolução espacial de 1,875 graus de longitude e 1,275 graus de latitude (aproximadamente 150 km), e

38 níveis verticais na atmosfera, chegando a aproximadamente 40 km de altitude. O HadGEM2-ES foi o modelo do Met Office do Hadley Centre para o conjunto de simulações do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Resultados dessas simulações foram utilizadas no relatório do IPCC de 2013.

O MCR Eta é um modelo de área limitada por pontos de grade. Uma das características do modelo é a coordenada vertical Eta (Marengo *et al.*, 2012), que representa a topografia em etapas. As superfícies aproximadamente horizontais da coordenada reduzem os erros no cálculo das derivadas horizontais, em particular a força do gradiente de pressão. Portanto, a coordenada Eta é especialmente adequada para trabalhar em regiões de topografia íngreme (Chou *et al.*, 2014b). O MCR Eta, desenvolvido no CPTEC/Inpe, é capaz de gerar projeções em alta resolução para integrações multidecadais e tem sido utilizado como base para diversos estudos de validação, impactos, vulnerabilidades e adaptações em território nacional (Moss *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b; The HadGEM2 Development Team: G. M. Martin *et al.*, 2011; Chou *et al.*, 2012; Chou; Nunes; Cavalcanti, 2000; Chou; Bustamante; Gomes, 2005; Cruz *et al.*, 2017; Pesquero *et al.*, 2010; Rocha *et al.*, 2018; Marengo *et al.*, 2012; Mesinger *et al.*, 2012; Sousa *et al.*, 2019; Paula, 2019; Costa *et al.*, 2019; Seminário da Rede Agrohidro, 2016; Chou *et al.*, 2014c; Dereczynski; Silva; Marengo, 2013).

Maior resolução especial obtida por *downscaling*, serve para estudos de impactos local. Poucos países como o Japão, a Inglaterra, os EUA e o Brasil têm essa capacidade. Saídas dos modelos como campos de temperatura, precipitação, pressão, vento, radiação etc., são utilizadas como condições de contorno. A Figura 1 mostra as etapas de como é feito o *downscaling*, partindo do MCG HadGEM2-ES até chegar à alta resolução de 5km do MCR Eta, que teve simulações realizadas no CPTEC do Inpe.



**Figura 1. Esquema mostrando as etapas de *downscaling* regional baseado em estudos do modelo Eta-CPTEC**

Fonte: Moss *et al.* (2010), Chou *et al.* (2014a), Chou *et al.* (2014b) e The HadGEM2 Development Team: G. M. Martin *et al.* (2011).

### 1.3 Índices de extremos climáticos

Uma maneira de analisar impactos das mudanças climáticas nos desastres naturais é a utilização de índices de extremos climáticos (Riahi; Grübler; Nakicenovic, 2007; Frich *et al.*, 2002; Zhang; Yang, 2004; Zhang *et al.*, 2005; WMO, s.d.; Sillmann *et al.*, 2013a), os quais apontam a intensidade e a frequência de eventos extremos. Foram avaliados dois índices de extremos climáticos baseados na precipitação: os índices de extremos climáticos TX90p (baseado na temperatura) e CDD (baseado na chuva), descritos na Tabela 1. Os índices descritos na Tabela 1 foram calculados para cada ponto de grade utilizando o modelo regional Eta-CPTEC. Nos resultados, os

cálculos de anomalias das projeções futuras em relação ao período histórico (1961-1990), quando comparados as projeções de valores absolutos, têm a vantagem de indicar as regiões onde os extremos têm menor ou maior amplitude, indicando, dessa forma, áreas que podem sofrer maiores impactos. Os resultados foram obtidos a partir do modelo regional Eta-CPTEC com resolução de 5 e 20 km.

Índice	Descrição	Relacionado com
<b>TX90p</b>	Porcentagem anual de dias em que TX > percentil 90 (%)	Indica a frequência de dias muito quentes no ano.
<b>CDD</b>	Número máximo de dias consecutivos sem chuva no ano (em dias).	Duração de períodos de estiagem (possibilidade de veranicos).

**Tabela 1. Descrição dos índices de extremos climáticos utilizados**

Fonte: Frich *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2005; Sillmann *et al.*, 2013a.

## 2. Resultados

### 2.1 Análise de projeções de clima no Espírito Santo utilizando modelagem regional de alta resolução

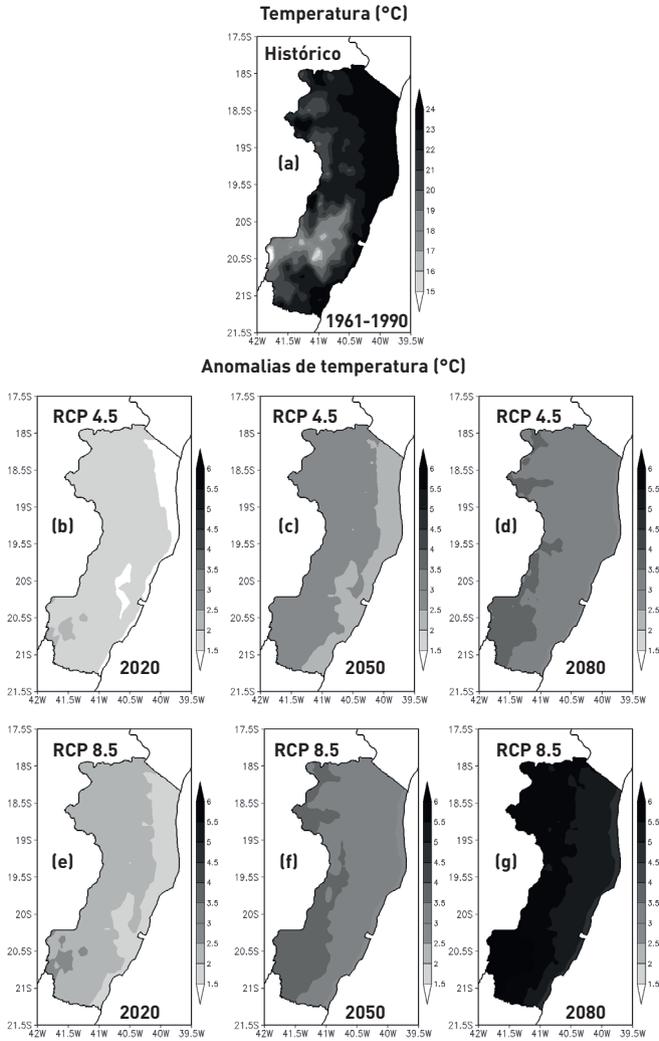
Nesse tópico, são utilizadas as simulações do modelo regional Eta-CPTEC com 5km de resolução espacial aninhado ao modelo global HadGEM2-ES. São analisadas as variáveis: temperatura média, chuva acumulada anual e o índice extremo CDD. De antemão, é importante ressaltar que se trata de simulações de um único modelo, e não de um Multi-model Ensemble. Por um lado, se tem a vantagem da mais alta resolução, que reflete em melhor detalhamento, mas, por outro, o erro sistemático do modelo não é diminuído quando se utiliza a média de vários modelos. O modelo Eta-CPTEC, quando aninhado ao modelo global HadGEM2-ES, aquece mais e simula menos chuva quando comparado à média dos modelos do IPCC-AR5 (Nobre *et al.*, 2011) e quando é aninhado aos modelos globais MIROC5 e CANESM2 (Moss *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2014a).

### 2.1.1 *Temperatura média*

A Figura 2 mostra um mosaico de mapas de temperatura média para o estado do Espírito Santo, no qual a simulação do modelo regional Eta-CPTEC aninhado ao modelo global HadGEM2-ES expõe, na Figura 2a (período histórico de 1961 até 1990), temperaturas entre 18 e 24 °C. As regiões mais quentes representadas pela cor vermelha mais escura estão localizadas no Nordeste e litoral do estado. As anomalias mostram aquecimento em todos os cenários, conforme descrição na sequência. A Figura 2b (RCP 4.5 em 2020S) apresenta anomalias de temperatura aumentando entre 1.5 e 2 °C na porção Oeste do estado (mancha amarela clara no mapa) quando se compara ao período histórico (1961-1990). No Sul do estado a mancha amarela mais escura indica aquecimento de 2 a 2.5 °C em relação ao período histórico (1961-1990).

A Figura 2c (RCP 4.5 em 2050S), por sua vez, apresenta anomalias de temperatura entre 2 e 2.5 °C na porção Oeste do estado (mancha amarela clara no mapa), enquanto, ao longo do litoral, o aquecimento projetado é de 1.5 a 2 °C. Em relação ao período histórico, a Figura 2d (RCP 4.5 em 2080S) mostra anomalias de temperatura projetada da ordem de 3 a 3.5 °C de aquecimento sobre quase todo o estado. Valores entre 2.5 e 3 °C são projetados para a região ao longo da borda Oeste do estado, ao passo que a projeção ficou entre 2.5 e 3 °C na faixa estreita ao longo do litoral.

Já a Figura 2e (RCP 8.5 em 2020S) expõe anomalias de temperatura entre 1 e 2 °C na porção Leste do estado, sendo que na região Centro-Oeste, os valores de anomalia de temperatura são de 2 a 2.5 °C. No Sul do estado, a mancha alaranjada indica aquecimento entre 2.5 e 3 °C. Ainda, a Figura 2f (RCP 8.5 em 2050S) mostra anomalias de temperatura de 2.5 a 3 °C na faixa estreita ao longo do litoral do estado, e o valor do aquecimento aumenta entre 3 e 3.5 °C sobre a maior parte do estado, aumentando ainda mais (de 3.5 a 4 °C) no Sudeste e Oeste do estado. Por fim, a Figura 2g (RCP 8.5 em 2080S) apresenta anomalias de temperatura projetada da ordem de 4 a 4.5 °C ao longo do litoral. Esse valor aumenta em direção ao Oeste do estado, chegando a 6 °C de aquecimento em relação ao período histórico.



**Figura 2. (a) Temperatura média simulada para o período histórico (1961-1990). (b), (c) e (d) Anomalias de temperatura média para o RCP 4.5 nos *timeslices* 2020S, 2050S, e 2080S, respectivamente. (e), (f) e (g) Anomalias de temperatura média para o RCP 8.5 para os *timeslices* 2020S, 2050S e 2080S, respectivamente. As anomalias são em relação ao período histórico (1961-1990), Figura 2a. A unidade é °C**  
Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do MCR Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).

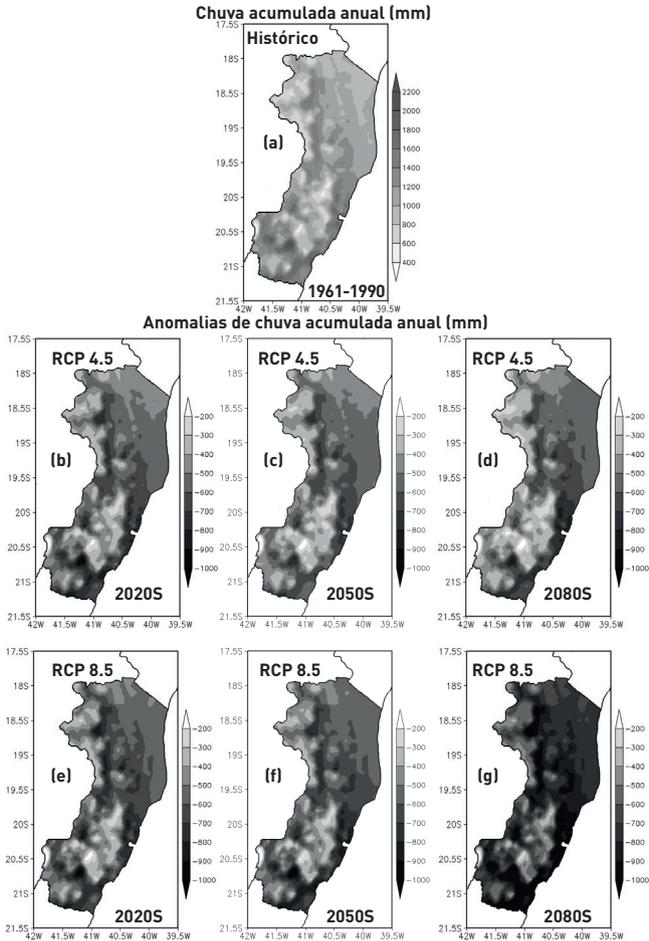
### 2.1.2 *Chuva acumulada anual*

A simulação do modelo regional Eta-CPTEC aninhado ao modelo global HadGEM2-ES mostra, no mapa da Figura 3a (período histórico de 1961 até 1990), os valores de chuva que ficam entre 400 e 2200 mm e o valor médio entre 1200 e 1400mm. O mapa mostra menos chuva no Norte do estado e mais no Sul do estado. As figuras de anomalias estão descritas a seguir.

Em relação ao período histórico, as Figuras 3b (RCP 4.5 em 2020S), 3c (RCP 4.5 em 2050S) e 3d (RCP 4.5 em 2080S) são semelhantes, apresentam menos chuva sobre todo o estado, e valores de anomalia negativa maiores (manchas mais vermelhas) são projetadas para o Sul do estado (menos 600 a 700 mm de chuva ao ano do que durante 1961-1900). Uma região entre 20.5 - 21 Sul e 41.5 - 40 Oeste mostra, ainda, menos 900 a 1000 mm de chuva no futuro em relação ao período histórico (1961-1990).

As Figuras 3e (RCP 8.5 em 2020S), 3f (RCP 8.5 em 2050S) e 3g (RCP 8.5 em 2080S) mostram um padrão espacial semelhante, com menos chuva sobre todo o estado, com valores de anomalia negativa maiores (manchas mais vermelhas) que são projetadas para o Sul (menos 700 a 800 mm de chuva ao ano). Uma região entre 20.5 - 21 Sul e 41.5 - 40 Oeste mostra ainda menos 900-1000 mm de chuva no futuro para o (RCP 8.5 em 2080S) que no período histórico.

Em relação as projeções futuras o maior contraste pode ser observado entre as Figuras 3b (RCP 4.5 em 2020S) e 3g (RCP 8.5 em 2080S) em que o cenário de altas emissões no fim do século (RCP 8.5 em 2080S) projeta menos chuva sobre todo o estado do Espírito Santo, onde as cores mais avermelhadas (menos chuva) prevalecem em todo mapa quando se compara com a projeção do cenário de médias emissões (RCP 4.5 em 2020S).



**Figura 3.** (a) Chuva acumulada anual simulada para o período histórico (1961-1990). (b) Anomalia de chuva para o RCP 4.5 no *timeslice* 2020S. (c) Anomalia de chuva para o RCP 4.5 no *timeslice* 2050S. (d) Anomalia de chuva para o RCP 4.5 no *timeslice* 2080S. (e) Anomalia de chuva para o RCP 8.5 no *timeslice* 2020S. (f) Anomalia de chuva para o RCP 8.5 no *timeslice* 2050S. (g) Anomalia de chuva para o RCP 8.5 no *timeslice* 2080S. As anomalias são em relação ao período histórico (1961-1990), Figura 3a. A unidade é mm

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do MCR Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).

A Figura 3g (RCP 8.5 em 2080S) mostra o mesmo padrão espacial ao das Figuras 3e e 3f, porém as anomalias de chuva são ainda maiores. A mancha vermelha mais escura, que representa menos 1000 mm de chuva ao ano, aumenta e se espalha sobre várias regiões do estado. Esse padrão de menos chuva no futuro é observado especialmente no Sul do Espírito Santo no cenário mais pessimista, de altas emissões de GEE. É importante salientar que o modelo Eta aninhado ao modelo global HadGEM2-ES projeta menos chuva que a média dos modelos do último relatório do IPCC-AR5 (IPCC, 2013; Nobre *et al.*, 2011).

### 2.1.3 Temperaturas máxima e mínima

A simulação do modelo regional Eta-CPTEC aninhado ao modelo global HadGEM2-ES mostra valores em que a temperatura máxima é mais elevada no Norte do estado, com valores entre 28 e 30 °C. Já no Sudoeste, os valores são menores, da ordem de 20 a 26 °C (Figura 4<sup>a</sup>). Nas figuras de anomalias, as manchas mais vermelhas indicam que, no futuro, a temperatura máxima vai aumentar. Na Figura 4b, na simulação para o cenário de médias emissões (RCP 4.5) no *timeslice* 2020S se observa um aumento de 3 °C no Sudoeste, mas menor que 3 °C (branco na figura) no restante do estado. Na Figura 4c (RCP 4.5 no *timeslice* em 2050S), a anomalia projetada é de 3 °C no Leste e 3.5 °C no Oeste. O mesmo padrão é observado na Figura 4d, porém, a anomalia aumenta para 4 °C no Leste e 4.5 °C no Oeste do estado. Para o cenário de altas emissões de GEE, RCP 8.5 no *timeslice* em 2020S, a anomalia de temperatura máxima chega a 4 °C - 5.5 °C em 2050S, e até 7 °C no Oeste do estado no final do século, como mostram as figuras 4e, 4f e 4g respectivamente.

Ainda, a Figura 5a apresenta valores em que a temperatura mínima é mais elevada numa faixa Leste do estado, com valores entre 18 e 20 °C. Já no Oeste, os valores são menores, da ordem de 14 a 16 °C. Nas figuras de anomalias, as simulações expõem as manchas mais vermelhas, que indicam uma temperatura mínima maior no futuro. Por sua vez, a Figura 5b apresenta a simulação do cenário de médias emissões (RCP 4.5) no *timeslice* 2020S. e mostra um aumento de 1 °C no Sul, embora menor que 1 °C (branco na figura) no restante do Espírito Santo. Na

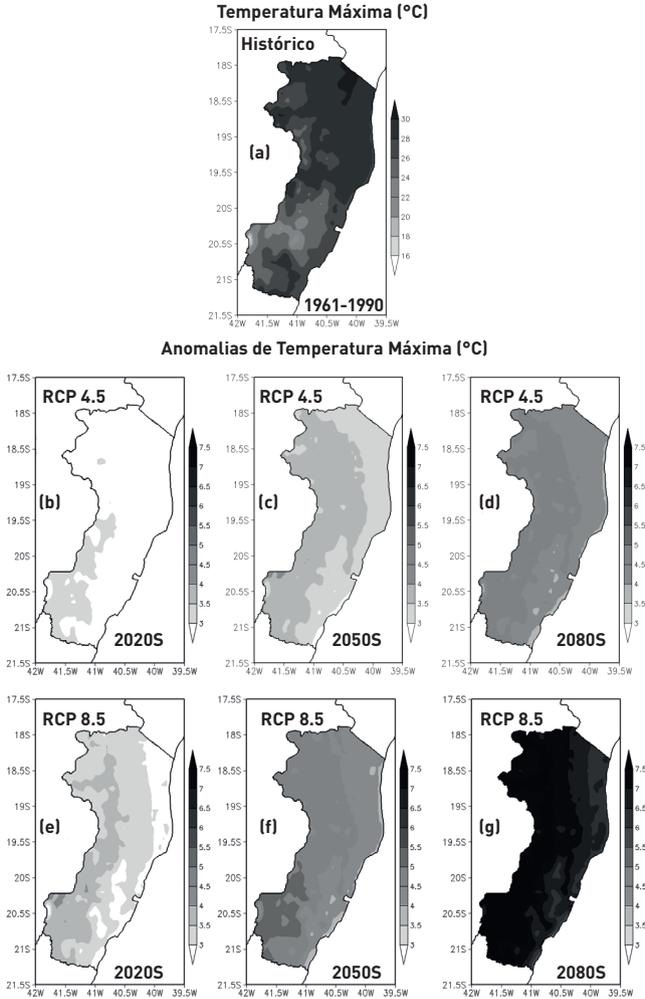
Figura 5c (RCP 4.5 no *timeslice* em 2050S), a anomalia de temperatura mínima projetada aumenta de 1 a 2 °C na maior porção do estado e 2 a 2.5 °C no Sul. Ao final do século, é observada, na Figura 5d, uma anomalia entre 3 e 3.5 °C sobre quase todo território do estado. Para o cenário RCP 8.5 (altas emissões de GEE), no *timeslice* em 2020S, a anomalia de temperatura mínima aponta uma elevação entre 1 e 1.5 °C, entre 2 e 3 °C em 2050S, e de até 5 °C, principalmente na porção mais ao Sul do estado no final do século, como mostram as figuras 5e, 5f e 5g, respectivamente. O padrão do aumento nas temperaturas máxima e mínima, bem como a intensidade desse aumento, simulados pelo modelo regional Eta-CPTEC aninhado ao modelo global HadGEM2-ES, estão de acordo com as projeções dos modelos globais do último relatório do IPCC-AR5 (IPCC, 2013; Nobre *et al.*, 2011).

### ***TX90p***

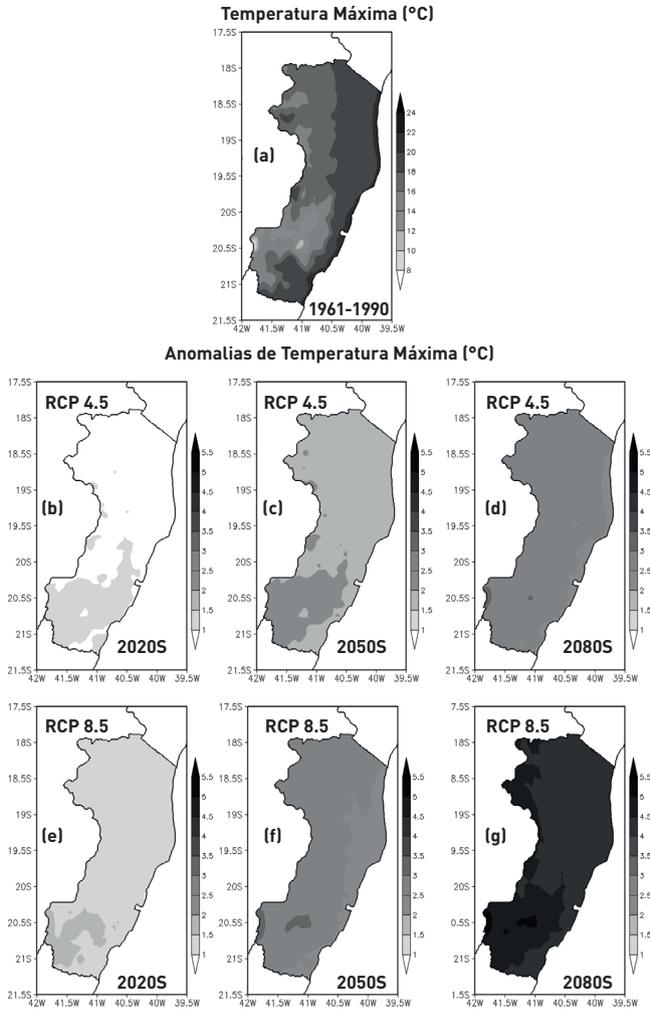
Também, foi feita a análise do índice de extremo de clima TX90p (Riahi; Grübler; Nakicenovic, 2007; Zhang *et al.*, 2005), o qual reflete a frequência de dias muito quentes no ano, conforme descrito na Tabela 1. Para tal avaliação, foi utilizado o Eta-CPTEC do Inpe com resolução espacial de 5km aninhado ao modelo global HadGen2-ES, como explicado na Figura 1.

A Figura 6 mostra o mosaico de mapas do índice de extremo de clima TX90p para o Espírito Santo. A Figura 6a é a simulação do modelo Eta-CPTEC para o período histórico (1961-1990), e indica que, durante esse período, a porcentagem de dias muito quentes indicados pelo índice extremo TX90p fica entre 10% na faixa estreita amarela clara ao longo do litoral, 11% na maior parte do Espírito Santo e 12% em regiões menores no Oeste do estado, correspondentes às manchas vermelhas na Figura 6a.

Por sua vez, na Figura 6b são demonstradas as projeções futuras para o cenário RCP 4.5 (médias emissões de GEE) no *timeslice* 2020S, em que a ocorrência de dias muito quentes aumenta 30% em relação ao período histórico em quase todo Espírito Santo. Em 2050s, a porcentagem de dias muito quentes aumenta de 50% a 80% no final do século, como é possível observar nas figuras 6c e 6d, respectivamente.



**Figura 4.** (a) Temperatura máxima simulada para o período histórico (1961-1990). (b), (c) e (d) Anomalias de temperatura máxima para o RCP 4.5 nos *timeslices* 2020S, 2050S, e 2080S, respectivamente. (e), (f) e (g) Anomalias de temperatura máxima para o RCP 8.5 para os *timeslices* 2020S, 2050S e 2080S, respectivamente. As anomalias são em relação ao período histórico (1961-1990), Figura 4a. A unidade é °C  
Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do modelo Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).



**Figura 5.** (a) Temperatura mínima simulada para o período histórico (1961-1990). (b), (c) e (d) Anomalias de temperatura mínima para o RCP 4.5 nos *timeslices* 2020S, 2050S, e 2080S, respectivamente. (e), (f) e (g) Anomalias de temperatura mínima para o RCP 8.5 para os *timeslices* 2020S, 2050S e 2080S, respectivamente. As anomalias são em relação ao período histórico (1961-1990), Figura 5a. A unidade é °C

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do MCR Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).

## 2.2 Índices de extremos climáticos no Espírito Santo

Foi efetuada a análise do índice de extremo de clima TX90p (Frich *et al.*, 2002; Riahi; Grübler; Nakicenovic, 2007; Zhang *et al.*, 2005), que representa a frequência de dias muito quentes no ano, conforme descrito na Tabela 1. Para tal avaliação, foi utilizado o Eta-CPTEC com resolução espacial de 5km aninhado ao modelo global HadGen2-ES, como explicado na Figura 1.

A Figura 6 mostra o mosaico de mapas do índice de extremo de clima TX90p para o Espírito Santo. A Figura 6a é a simulação do modelo Eta-CPTEC para o período histórico (1961-1990), e indica que, durante esse período, a porcentagem de dias muito quentes indicados pelo índice extremo TX90p fica entre 10% na faixa estreita amarela clara ao longo do litoral, 11% na maior parte do Espírito Santo e 12% em regiões menores no Oeste do estado, correspondentes às manchas vermelhas na Figura 6a.

Por sua vez, na Figura 6b são demonstradas as projeções futuras para o cenário RCP 4.5 (médias emissões de GEE) no timeslice 2020S, em que a ocorrência de dias muito quentes aumenta 30% em relação ao período histórico em quase todo Espírito Santo. Em 2050S, a porcentagem de dias muito quentes aumenta de 50% a 80% no final do século, como é possível observar nas Figuras 6c e 6d, respectivamente.

As projeções do cenário RCP 8.5 (altas emissões de GEE), projetadas para o timeslice em 2020S (Figura 6e), mostram o índice de extremo de clima TX90p aumentando em até 50%, principalmente na porção Oeste do estado, em comparação ao período histórico. A projeção desse índice para 2050S (Figura 6f) demonstra aumento de até 70%, chegando até um aumento 90% em dias muito quentes (Figura 6g), em relação ao período histórico.

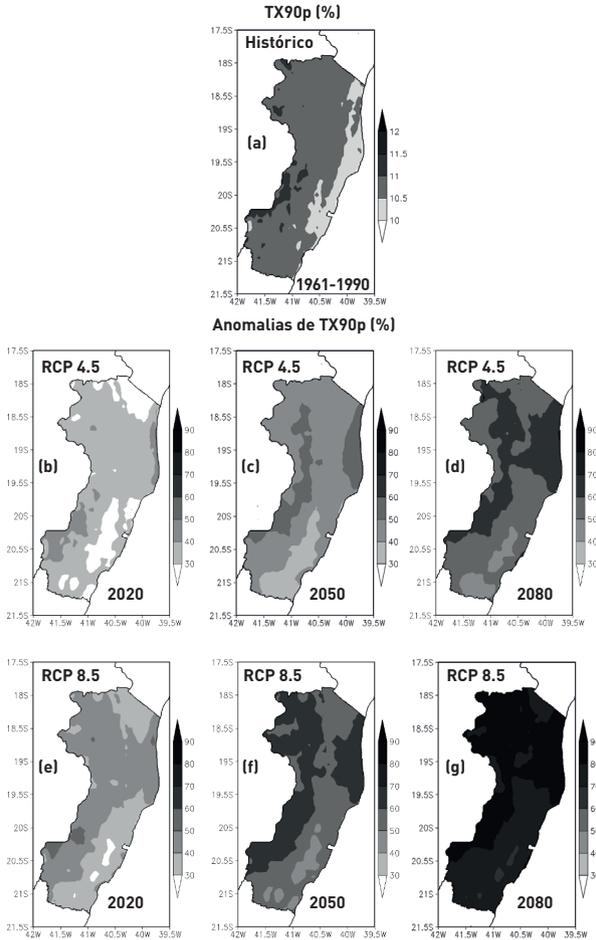
O mosaico de mapas do índice de extremo climático TX90p indica que, em relação ao período histórico, quanto mais se avança no tempo e quanto mais pessimista é o cenário de aumento de GEE (RCP 8.5), maior é a porcentagem de dias muito quentes até

o final desse século. Isso se trata de um alerta para a saúde humana devido ao possível aumento de estresse por calor, insuficiência cardíaca e lesão renal aguda por desidratação (Sillmann *et al.*, 2013b; Hacon *et al.*, 2019; Watts *et al.*, 2019).

## **CDD**

Aqui é feita uma análise do índice extremo CDD (Riahi; Grübler; Nakicenovic, 2007; Zhang *et al.*, 2005), que indica a duração de períodos de estiagem utilizando o modelo, ou seja, a etapa 5 do *downscaling* regional mostrado na Figura 1. Novamente, é importante enfatizar que se trata de simulações de um único modelo que, por um lado tem a vantagem da mais alta resolução, o que reflete em melhor detalhamento, mas que, por outro lado, não diminui o erro sistemático do modelo quando se utiliza a média de vários modelos.

A Figura 7 detalha os mapas do CDD para o estado do Espírito Santo, e na Figura 7a se observa que, durante o período histórico (1961-1990), no litoral Norte ocorrem de 35 a 40 dias de CDD. Já na região Noroeste do estado, ocorrem 50 dias de CDD. A Figura 7b (RCP 4.5 em 2020S, média de 2011 até 2040), expõe um aumento de até 30 dias de CDD nas porções Norte e Noroeste do estado. No Sul, a ocorrência de CDD é menor, ficando entre 10 e 20 dias. A Figura 7c (RCP 4.5 em 2050S, média de 2041 até 2070) mostra um aumento em relação ao período histórico de até 30 dias de CDD na região Norte do estado. No entanto, ao Sul esse aumento de CDD é menor, e fica entre 10 e 20 dias. A Figura 7d (RCP 4.5 em 2080S, média de 2071 até 2099) demonstra um aumento de até 40 dias de CDD em partes da região Norte do estado. A Figura 7e (RCP 8.5 em 2020S) mostra aumento de até 40 dias de CDD na porção Centro-Norte do estado. No Sul, o valor é menor, ficando entre 10 e 20 dias de CDD. A Figura 7f (RCP 8.5 em 2050S) mostra aumento de até 50 dias de CDD na porção Norte do estado. No Sul o aumento é menor, e tem entre 20 e 30 dias de ocorrência desse índice extremo.

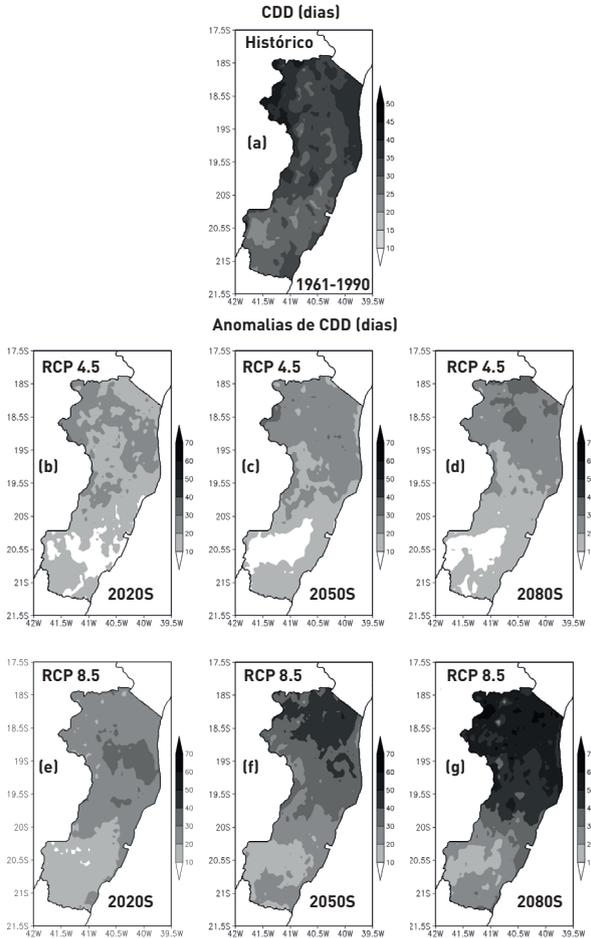


**Figura 6.** (a) TX90p (%) simulado para o período histórico (1961-1990). (b) Anomalia de TX90p para o RCP 4.5 no *timeslice* 2020S. (c) Anomalia de TX90p para o RCP 4.5 no *timeslice* 2050S. (d) Anomalia de TX90p para o RCP 4.5 no *timeslice* 2080S. (e) Anomalia de TX90p para o RCP 8.5 no *timeslice* 2020S. (f) Anomalia de TX90p para o RCP 8.5 no *timeslice* 2050S. (g) Anomalia de TX90p para o RCP 8.5 no *timeslice* 2080S. As anomalias são em relação ao período histórico (1961-1990), Figura 6a

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do MCR Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).

A Figura 7g (RCP 8.5 em 2080S) mostra aumento de até 70 dias de CDD na porção Norte do estado quando comparado ao período histórico. No Sul, o aumento de dias de CDD é da ordem de 20 a 30 dias em relação ao período histórico.

As figuras do índice de extremo climático CDD que reflete a duração de períodos de estiagem mostra que, em relação ao período histórico, quanto mais se avança no tempo até o final do século e quanto mais pessimista é o cenário de aumento de GEE (RCP 8.5), maior é a ocorrência desse índice extremo, principalmente na porção Norte do Espírito Santo. O CDD é um índice obtido a partir da chuva, e os resultados mostrados na Figura 7 vão de acordo com a Figura 3 das projeções de menos chuva no futuro. É importante ressaltar, mais uma vez, que se trata de simulações de um único modelo e que o modelo Eta-CPTEC aninhado ao modelo global HadGen2-ES projeta menos chuva que a média dos modelos do IPCC-AR5 (IPCC, 2013; Nobre *et al.*, 2011).



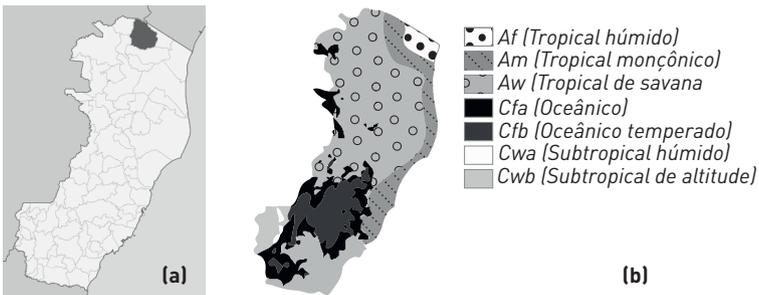
**Figura 7. (a) CDD simulado para o período histórico (1961-1990). (b) Anomalia de CDD para o RCP 4.5 no *timeslice* 2020S. (c) Anomalia de CDD para o RCP 4.5 no *timeslice* 2050S. (d) Anomalia de CDD para o RCP 4.5 no *timeslice* 2080S. (e) Anomalia de CDD para o RCP 8.5 no *timeslice* 2020S. (f) Anomalia de CDD para o RCP 8.5 no *timeslice* 2050S. (g) Anomalia de CDD para o RCP 8.5 no *timeslice* 2080S. As anomalias são em relação ao período histórico (1961-1990), Figura 7a. A unidade é dias**

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do MCR Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).

### 2.3 Avaliação do índice de extremo climático CDD na cidade de Montanha-ES

Nesse tópico, foi utilizado o conjunto de experimentos numéricos do modelo regional ETA-CPTEC (Moss *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b; WMO, s.d.) com resolução espacial de 20 km para o cenário RCP 8.5 (altas emissões de GEE), que contém 4 experimentos obtidos a partir do aninhamento desse modelo regional aos modelos globais HadGen2-ES, MIROC5, CANESM2-ES e BESM. A partir desses 4 experimentos numéricos, foi calculada a média representando um Multi-model Ensemble regionalizado.

Com base na Figura 7, na qual se observa o índice climático extremo CDD na região Norte do estado do Espírito Santo, foi selecionado o município de Montanha. O município localiza-se na latitude  $18^{\circ} 07' 33''$  S e longitude  $40^{\circ} 21' 46''$  W. Sua principal atividade econômica é a pecuária, e as principais culturas agrícolas são de café, abóbora, feijão e mandioca (Lyra *et al.*, 2017; IBGE, s.d.). De acordo com a Figura 8, a cidade se localiza numa região entre clima tropical de savana e tropical monçônico.



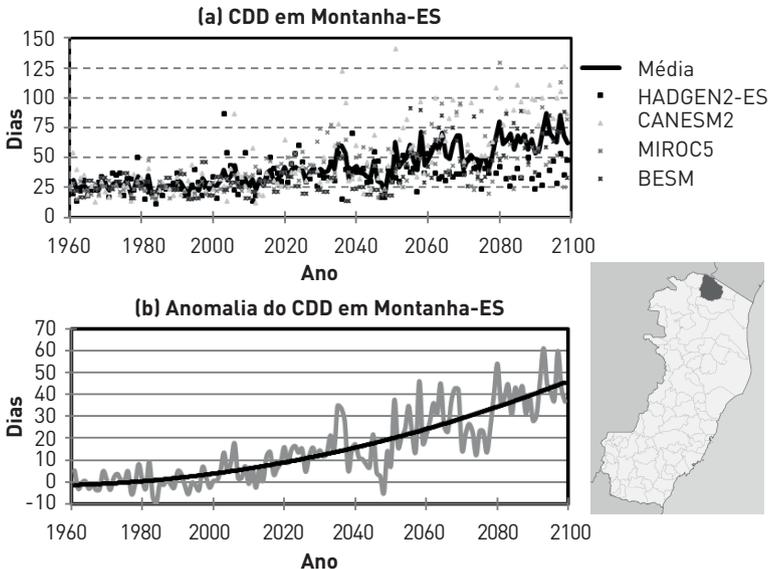
**Figura 8. (a) Localização da cidade de Montanha no Espírito Santo.**

**(b) Classificação climática de Köppen para o Espírito Santo**

Fonte: Adaptada de Wikipedia (s.d.).

A Figura 8a mostra a série temporal para o índice climático extremo CDD para o município de Montanha-ES, na qual a média dos quatro experimentos numéricos projeta um aumento dos dias com a presença desse índice ao longo do tempo. No início da série,

os dias com CDD são 25 aproximadamente, aumentando para cerca de 80 no final do século. Analisando os experimentos individuais, o modelo Eta-CPTEC aninhado aos modelos globais apresenta valores ainda superiores no fim do século, chegando até a 125 dias de ocorrência de CDD nesse município. A Figura 8b apresenta a anomalia de CDD em relação ao período base 1961-1990, com maior número de dias com CDD, chegando até a 60 dias a mais no fim desse século em relação ao período base. A linha de tendência indica a forma exponencial ao longo do tempo, com aumento de 45 dias com CDD em relação ao período histórico (1961-1990).



**Figura 8. Série temporal do índice de extremo climático de dias secos consecutivos (CDD) (em dias). (a) Valores absolutos obtidos dos experimentos numéricos do modelo regional Eta-CPTEC aninhado aos modelos globais HADGEN2-ES, CANESM2, MIROC5 e BESM. A linha preta representa a média dos quatro experimentos. (b) Anomalia da média das quatro simulações em relação ao período histórico (1961-1990). A linha preta representa a tendência**

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados do MCR Eta-CPTEC disponibilizados pelo Inpe (s.d.).

## Considerações finais

As simulações do modelo regional Eta-CPTEC aninhado ao modelo global HADGEM2-ES com alta resolução de 5km mostram projeções de anomalias de temperatura que apontam para um futuro em que o clima do Espírito Santo estará mais quente que no período 1961-1990. Os valores de aquecimento adicional vão de 1.5 °C, para o RCP 4.5 (cenário de estabilização de médias emissões de GEE), até 6 °C no cenário mais extremo, o RCP8.5 em 2080s.

As anomalias de chuva indicam que, no futuro, ocorrerá menos chuva sobre todo o estado do Espírito Santo em relação ao período histórico (1961-1990). Os valores chegam a uma redução de 1000 mm de chuva anual, principalmente no litoral Sul e em regiões no Sul do estado, no cenário de altas emissões de GEE no final do século, RCP 8.5 em 2080s.

A possibilidade de que eventos climáticos extremos sejam mais frequentes e/ou intensos num clima de aquecimento global no futuro tem sido demonstrada pelas projeções dos modelos computacionais dos sistemas terrestres/climáticos nos relatórios recentes do IPCC, como o AR5 (IPCC, 2013; 2014). Para o estado do Espírito Santo, o índice climático extremo CDD que reflete a duração de períodos de estiagem, como veranicos, aumenta tanto no cenário de médias emissões RCP 4.5, como no cenário de altas emissões RCP 8.5. Esse aumento ocorre principalmente no Norte do estado com ocorrência desse índice chegando a mais de 70 dias quando comparado ao período histórico (1961-1990).

É importante salientar que os modelos climáticos contêm incertezas e que o modelo global HADGEM2-ES em suas simulações aquece mais (projeta maiores temperaturas) e gera menos chuva que a média dos modelos do IPCC (Nobre *et al.*, 2011). No entanto, mesmo que os resultados apresentados aqui sejam derivados de simulações de apenas um modelo regional, são importantes para atividades de monitoramento das características extremas a partir da temperatura e da chuva e futuros estudos de extremos climáticos no

Espírito Santo. São necessários mais estudos, por exemplo, na forma de um atlas de mudanças climáticas para o Espírito Santo utilizando mais modelos, variáveis e novos cenários de clima futuro como os do CMIP6 (Hacon *et al.*, 2019; Eyring *et al.*, 2016; CMIP6, s.d.).

## Referências

BURKETT, Virginia R. *et al.* Point of departure. *In: 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 IPCC.* Cambridge: Cambridge University Press, 2014, p. 169-194.

CHOU, Sin Chan *et al.* 5-km resolution Eta model downscaling of present climate in the city of Santos, Brazil. *In: INSTITUTE FOR THE DEVELOPMENT OF WATER RESOURCES; SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES (eds.). Water management in transition countries as impacted by climate change and other global changes, lessons from paleoclimate, and regional Issues.* 1. ed. Belgrado, 2014c, v. 1, p. 80-85.

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

CHOU, Sin Chan *et al.* Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Clim. Dyn.**, v. 38, n. 3-4, p. 635-653, 2012.

CHOU, Sin Chan *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014a.

CHOU, Sin Chan; BUSTAMANTE, Josiane Ferreira; GOMES, Jorge Luis. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005.

CHOU, Sin Chan; NUNES, Ana Maria Bueno; CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque. Extended range forecasts over South America using the regional Eta Model. **J. Geophys. Res.**, v. 105, n. D8, p. 10147-10160, 2000.

CLARKE, Leon *et al.* Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. **US Department of Energy Publications**, v. 6, 2007.

CMIP6. **Homepage**. Disponível em: <https://bit.ly/3FIPXuL>. Acesso em: 01 mar. 2023

COSTA, Claudia Priscila Wanzeler da *et al.* Avaliação de simulação histórica da precipitação e temperatura na amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15, v. 25, 2019.

CRUZ, Marcos Aurélio Soares *et al.* Avaliação das precipitações geradas pelo modelo climático regional ETA-HadGEM2-ES para o Estado de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 13, n. 10, 2017.

DERECZYNSKI, Claudine; SILVA, Wanderson Luiz; MARENGO, Jose. Detection and projections of climate change in Rio de Janeiro, Brazil. **Am. J. Clim. Chang.**, v. 2, n. 1, p. 25-33, 2013.

ESPINOZA, Jhan Carlo *et al.* The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropicalsubtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, p. 1-9, 2014.

ESPINOZA, Jhan Carlo *et al.* The major floods in the Amazonas river and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970–2012 period: a focus on the 2012 flood. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 3, p. 1000-1008, 2013.

EYRING, Veronika *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geosci. Model Dev.**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.

FLATO, Gregory. *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* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press; New York: United Kingdom, 2013.

FRICH, P. *et al.* Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, n. 3, p. 193-212, 2002.

HACON, Sandra de Souza *et al.* A Review of the Health Sector Impacts of 4°C or more Temperature Rise. **Springer**, p. 67-129, 2019.

HAYLOCK, Malcolm. R. *et al.* Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama**. Disponível em: <https://bit.ly/3DRikAX>. Acesso em: 01 mar. 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Projeta**. Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo Eta. Disponível em: <https://bit.ly/3PtD0Ir>. Acesso em: 10 out. 2021.

INPE. Modelo BESM. Disponível em: <https://bit.ly/3Ns6C7J>. Acesso em: 28 fev. 2023.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, 2013.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014**. Disponível em: <https://bit.ly/3TYL2Ks>. Acesso em: 28 fev. 2023

LEWIS, Simon L. *et al.* The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554-554, 2011.

LYRA, Andre *et al.* Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 132, p. 663-682, 2017.

MARENGO, José Antonio *et al.* An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. **Climatic Change**, v. 98, n. 3-4, p. 509-529, 2010.

MARENGO, José Antonio *et al.* 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**, v. 38, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, José Antonio *et al.* Extreme climatic events in the Amazon basin climatological and hydrological context of recent floods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 73-85, 2012.

MARENGO, José Antonio *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, José Antonio *et al.* Two contrasting seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013.

MARENGO, José Antonio; VALVERDE, Maria C.; OBREGON, Guillermo O. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. **Climate Research**, v. 57, p. 61-72, 2013.

MESINGER, Fedor *et al.* An Upgraded Version of the Eta Model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.

MILLER, Ron L. *et al.* CMIP5 historical simulations (1850-2012) with GISS ModelE2. **J. Adv. Model. Earth Syst.**, v. 6, n. 2, p. 441-477, 2014.

MONTANHA-ES. **Prefeitura**. Disponível em: <https://bit.ly/3DRd7h5>. Acesso em: 22 jan. 2021.

MOSS, Richard H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, 2010.

NOBRE, Carlos Afonso *et al.* Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. In: MOTTA, Ronaldo Seroa da *et al.* (eds.). **Mudança do Clima no Brasil: aspectos, sociais e regulatórios**. Brasília: Ipea, 2011.

PAULA, Sany Laisla de. **Projeções de mudanças na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Grande, Sudeste do Brasil, sob cenário de mudanças climáticas**. 2019. 66f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PESQUERO, José Fernando *et al.* Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 75-93, 2010.

RIAHY, Keywan; GRÜBLER, Arnulf; NAKICENOVIC, Nebojsa. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 887-935, 2007.

ROCHA, Vinícius Machado *et al.* Análise da precipitação na bacia amazônica utilizando o modelo eta-hadgem2-es no período de 1985 a 2005. **Revista de Geografia - PPGO - UFJF**, v. 8, n. 2, 2018.

SANDERSON, Michael G.; HEMMING, Deborah Louise; BETTS, Richard A. Regional temperature and precipitation changes under high-end (>4 °C) global warming. **Philosophical Transactions of The Royal Society A**, v. 369, n. 1934, p. 85-98, 2011.

SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO. Água e agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra: anais do IV Seminário da Rede Agrohidro, Brasília, DF, 17- 20 de outubro de 2016 [recurso eletrônico] / Lineu Neiva Rodrigues, Maria Fernanda Moura, Raimundo Cosme de Oliveira Junior, editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2016.

SILLMANN, Jana *et al.* Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 1: Model evaluation in the present climate. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 4, p. 1716-1733, 2013a.

SILLMANN, Jana *et al.* Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 2: Future climate projections. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 6, p. 2473-2493, 2013b.

SOUSA, Rhonan Martins de *et al.* Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 15, v. 24, 2019.

TAYLOR, Karl E.; STOUFFER, Ronald J.; MEEHL, Gerald A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012.

THE HadGEM2 Development Team: G. M. Martin *et al.* The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 723-757, 2011.

WATTS, Nick *et al.* The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. **The Lancet**, v. 394, n. 10211, p. 1836-1878, 2019.

WCRP. World Climate Research Programme. CMIP6. Disponível em: <https://bit.ly/3SZmG1P>. Acesso em: 17 nov. 2021.

WIKIPEDIA. Disponível em: <https://bit.ly/3Ye5B8v>. Acesso em: 13 nov. 2022.

WIKIPEDIA. Disponível em: <https://bit.ly/3rVT5yk>. Acesso em: 13 nov. 2022.

WISE, Marshall *et al.* Implications of limiting CO<sub>2</sub> concentrations for land use and energy. **Science**, v. 324, n. 5931, p. 1183-1186, 2009.

WMO. World Meteorological Organization. **KNMI Climate Change Atlas**. Disponível em: <https://bit.ly/3gYH8mc>. Acesso em: 25 fev. 2023.

WMO. World Meteorological Organization. State of Climate Services 2020 Report: Move from Early Warnings to Early Action, 2020.

ZHANG, Xuebin *et al.* Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1641-1651, 2005.

ZHANG, Xuebin *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.

ZHANG, Xuebin; YANG, Feng. RCLinDex (1.0) User Guide. **Climate Research Branch Environment Canada**: Downsview, Ontario, Canada, 2004.



## CAPÍTULO 3

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RECURSOS HÍDRICOS

*Antônio A. Meira Neto  
Franciéli de Paula Dela Costa  
Diogo Costa Buarque*

### **Introdução**

As mudanças climáticas são caracterizadas por alterações na temperatura que podem alterar o clima da terra (Nobre *et al.*, 2012). O ciclo hidrológico é influenciado pelas mudanças climáticas, alterando a frequência e a intensidade das chuvas (IPCC, 2008), o que pode levar a muitos problemas ambientais relacionados aos recursos hídricos. As projeções futuras indicam que haverá chuvas mais concentradas em algumas regiões, com secas prolongadas e mais frequentes em função da redução da precipitação distribuída (IPCC, 2013).

Essas mudanças vêm ocorrendo em escala global, com evidência de um aumento na temperatura média na terra vinculada ao aumento da emissão de gases do efeito estufa (Field *et al.*, 2012; IPCC, 2014; IPCC, 2018). Esse aumento de temperatura traz como uma das consequências o aumento da frequência de eventos extremos, como tempestades e secas prolongadas, uma vez que altera o ciclo hidrológico, alterando os padrões de precipitação (Marengo, 2001; Marengo, 2008).

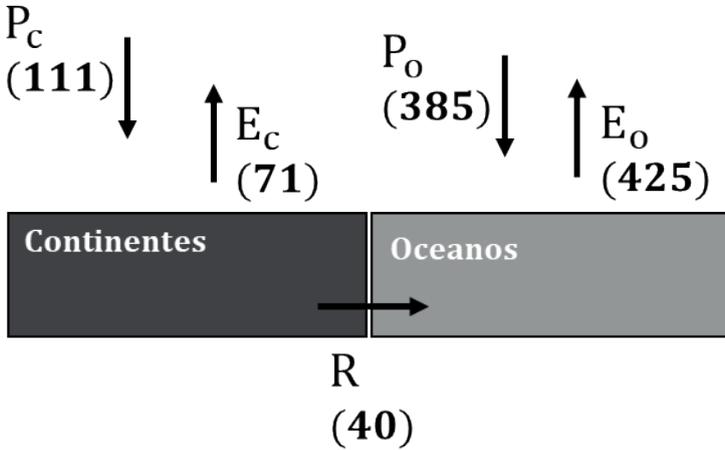
Períodos secos mais intensos comprometem, por exemplo, o abastecimento de água de uma região, especialmente quando esse abastecimento provém da captação em mananciais superficiais, cuja vazão tende a ser reduzida com uma diminuição da precipitação. Portanto, é necessário buscar medidas a fim de mitigar os impactos de uma baixa disponibilidade hídrica, isto é, uma redução da vazão dos rios, agravada pela redução da precipitação.

No entanto, quais poderão ser os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos regionais, nacionais, internacionais e globais? Esta pergunta vem sido feita por autoridades de todo o mundo, uma vez que a água é de suma importância para a sustentação da vida no planeta. Nessas avaliações, frequentemente os modelos hidrológicos tem sido uma ferramenta de suporte de grande importância, permitindo projetar a dinâmica das vazões nos cursos d'água de uma bacia em função das projeções climáticas.

Neste capítulo iremos discutir esses assuntos, iniciando com uma breve explicação sobre o ciclo hidrológico global e regional e quais são as possíveis alterações nesse ciclo devido às mudanças climáticas (item 4). A seguir, iremos tratar dos possíveis impactos dessas alterações em termos de disponibilidade hídrica para o mundo e para o Brasil. Falaremos ainda sobre o atual cenário da disponibilidade hídrica para o Espírito Santo e discutiremos brevemente sobre o possível impacto que as mudanças climáticas poderão trazer ao estado. Ao final, apresentaremos um estudo de caso envolvendo modelagem hidrológica com uso de dados de modelos climáticos para avaliação da variabilidade de vazões em uma grande bacia hidrográfica.

## 1. O ciclo hidrológico global

De forma geral, pode-se considerar o ciclo hidrológico no planeta Terra como um sistema fechado, no qual os fluxos ocorrem de maneira a se equilibrar globalmente. A Figura 1 exhibe esquematicamente a magnitude de cada um dos componentes do balanço hídrico global em unidades de  $1000 \text{ km}^3/\text{ano}$ . Grande parte da precipitação global incide sobre os oceanos ( $P_o$ ), onde também se vê o maior fluxo de evaporação ( $E_o$ ). Enquanto isso, parte da precipitação incidente nos continentes ( $P_c$ ) divide-se entre evapotranspiração (evaporação advinda de corpos d'água, solos e transpiração por plantas) e fluxo de retorno aos oceanos (R), que é representado pela vazão dos rios desaguando nos oceanos e pela drenagem de águas subterâneas diretamente aos oceanos (Church, 1996).

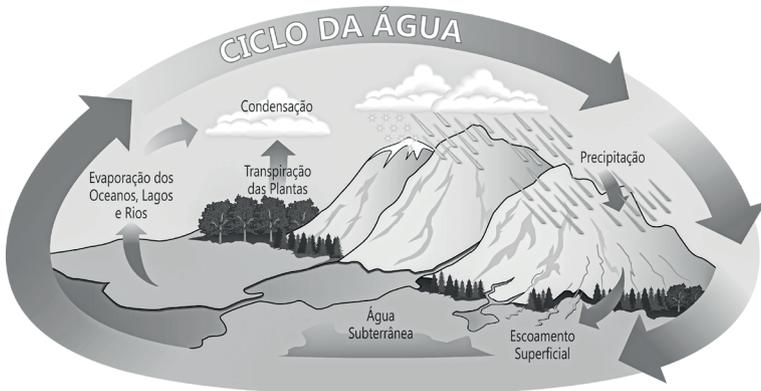


**Figura 1. Representação esquemática do ciclo hidrológico global, onde  $P_c$  representa a precipitação sobre os continentes,  $P_o$  é a precipitação sobre os oceanos,  $E_c$  é a evapotranspiração proveniente dos continentes e  $E_o$  a evaporação dos oceanos. O símbolo  $R$  denota o fluxo de retorno, caracterizado pelo deságue de rios e aquíferos costeiros diretamente nos oceanos. Todos os fluxos (entre parênteses) estão descritos em  $1000 \text{ km}^3$  por ano**  
 Fonte: Adaptado de Oki e Kanae (2006).

A **Figura 2** apresenta um diagrama do ciclo hidrológico da água, o qual descreve como a água evapora da superfície da terra, se eleva para a atmosfera, resfria e condensa nas nuvens e precipita em forma de chuva ou neve, caindo novamente na superfície da terra. O ciclo hidrológico global é responsável por distribuir continuamente a água da atmosfera para os rios, lagos e oceanos. Desta forma, está diretamente associado às mudanças de temperatura da atmosfera. Há algum tempo já era consenso entre os pesquisadores de que as mudanças climáticas iriam intensificar, acelerar ou fortalecer o ciclo hidrológico global.

De acordo com o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), as temperaturas

médias do planeta estão aumentando devido ao aumento da concentração de GEE na atmosfera. Desde a segunda metade do século 19, a temperatura média subiu 1,1 grau, podendo alcançar 1,5 grau de aquecimento nas próximas duas décadas, em um cenário otimista (IPCC, 2021).



**Figura 2. Ciclo hidrológico da água**

Fonte: Adaptado de <https://bit.ly/3BDTi0>.

Uma consequência direta deste aumento das temperaturas globais é o aumento da evaporação d'água da superfície terrestre e oceanos, com variações regionais relacionadas ao aquecimento futuro da superfície (IPCC, 2014), além de alterações regime de chuvas, no escoamento, na umidade do solo e na disponibilidade hídrica para abastecimento. Por exemplo, há forte indícios de que o aquecimento global poderá resultar em aumento da sazonalidade das chuvas, da disponibilidade hídrica e das vazões na Amazônia e em regiões subtropicais como Mediterrâneo e África do Sul (IPCC, 2021). Os impactos dessa variação de temperatura sobre os recursos hídricos estão apresentados mais adiante.

## 2. O ciclo hidrológico em bacias hidrográficas

Quando se estudam os recursos hídricos regionais, seja um estudo referente a um estado ou até mesmo a um país, é comum utilizar a bacia hidrográfica como a área de interesse. Bacias hidrográficas são simplesmente as regiões que contribuem para o escoamento de um rio. Elas podem ser definidas para um pequeno rio sem afluentes, como também para grandes rios com diversos afluentes, como o rio Amazonas, rio Doce etc. Nesse caso, o simples balanço hídrico global apresentado na **Figura 1** precisa ser adaptado: em uma bacia hidrográfica, podemos dizer que a precipitação ( $P$ ) incidente será repartida entre os fluxos de saída, representados pela vazão do rio no exutório da bacia ( $Q$ ), e a evapotranspiração ( $ET$ ), além da água temporariamente armazenada ( $\Delta S$ ) no solo, na copa das árvores etc. Dessa forma, podemos escrever uma simples equação de balanço hídrico:

$$P = Q + ET + \Delta S$$

Ao considerarmos escalas de tempo de três décadas ou mais, as variações de armazenamento de água no solo tendem a se anular, isto é, períodos úmidos ( $\Delta S > 0$ ) e períodos secos ( $\Delta S < 0$ ) se cancelam quando longos períodos de tempo são considerados. Isso nos permite escrever o balanço hídrico para tal escala de tempo como:

$$P = Q + ET$$

## 3. Ciclo hidrológico e mudanças climáticas: o aumento da intensidade do ciclo hidrológico

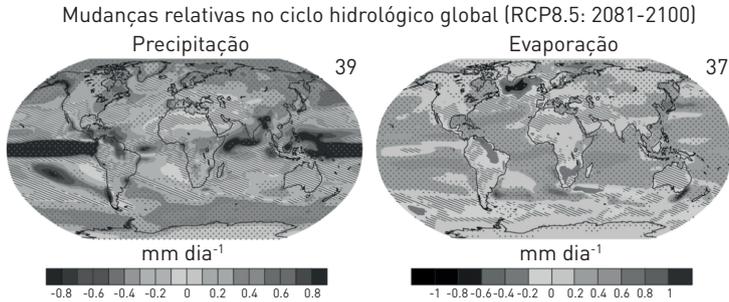
A expressão mais utilizada pelos cientistas para explicar as possíveis consequências do aumento da temperatura global no ciclo hidrológico é a **intensificação do ciclo hidrológico global** (Oki; Kanae, 2006; Huntington, 2006; Allan; Liepert, 2010; Allan *et al.*, 2020). Mas o que isso significa, e como isso pode ocorrer? Como foi visto

em capítulos anteriores, as temperaturas médias do planeta estão aumentando devido ao aumento da concentração de GEE na atmosfera. Uma consequência direta desse aumento das temperaturas globais é o aumento da evaporação d'água da superfície terrestre e oceanos (IPCC, 2014). Se lembrarmos que o ciclo hidrológico global está em equilíbrio, é fácil de entender que esse aumento da evaporação da água dos oceanos terá de ser acompanhado por um aumento da precipitação, que representa o retorno dessa água que foi, em certo momento, evaporada. Outro fator a favor de maiores taxas de precipitação é o fato de que uma atmosfera mais quente pode conter mais vapor d'água que uma atmosfera mais fria (Allan; Liepert, 2010). Isso pode, também, acarretar aumento das taxas de precipitação. Dessa forma, projeções de Modelos do Sistema Terrestre (MSTs) apontam para uma elevação de P e ET entre 1 e 3% a cada grau Celsius de aumento da temperatura nas superfícies (Allan *et al.*, 2020).

Apesar do consenso de que taxas globais de precipitação e evapotranspiração irão aumentar, essa afirmação pode levar à conclusão precipitada de que teremos um mundo com mais disponibilidade hídrica. É importante lembrar que as projeções de aumento se referem às médias globais, porém a distribuição espacial futura dos fluxos de precipitação e evapotranspiração certamente exibirá distintos padrões regionais. Embora a representação dos processos físicos que controlam processos terrestres, como precipitação e evapotranspiração, ainda seja sujeita a grandes incertezas em sua modelagem nos MSTs, importantes informações baseadas em comportamentos gerais observados comuns a grandes partes dos MSTs utilizados pelo IPCC já podem ser extraídas das projeções futuras. Essas são as melhores estimativas nas mãos das autoridades globais e que, atualmente, servem de norteadores da discussão sobre mudanças globais do ciclo hidrológico.

A Figura 3 resume os padrões globais de mudança da precipitação e evaporação para o final deste século (em relação ao período base 1986-2005), de acordo com projeções dos MSTs para o cenário de altas emissões de GEE (RCP 8.5) do 5º relatório do IPCC (2014) sobre mudanças climáticas. É possível observar alguns padrões globais de mudanças do ciclo hidrológico: percebe-se um aumento ge-

neralizado da precipitação nas massas continentais localizadas em altas latitudes, enquanto diversas regiões localizadas em médias latitudes, além de áreas subtropicais e semiáridas, demonstram redução da precipitação. Os padrões globais de evaporação apresentam semelhança aos da precipitação, sugerindo que as regiões com diminuição da precipitação anual estarão sujeitas a menores taxas de evaporação.



**Figura 3. Mudanças nas taxas anuais médias de Precipitação e Evaporação para o período de 2081-2100, relativo ao período base 1986-2005, para o cenário de altas emissões de GEE (RCP 8.5). O número de modelos do CMIP5 utilizados para a confecção das médias está indicado no canto superior direito. Hachuras representam regiões em que a mudança média é menor que um desvio padrão da variabilidade entre os modelos.**

**Regiões em pontilhado representam uma mudança média maior que dois desvios padrões da variabilidade entre os modelos e 90% ou mais de concordância a respeito do sinal da mudança (positivo *versus* negativo)**

Fonte: Adaptado IPCC (2014).

#### 4. Ciclo hidrológico global e mudanças climáticas: projeções futuras de disponibilidade hídrica superficial

Ao passo que as populações globais crescem, a demanda por água para abastecimento humano, agricultura e pecuária irá atingir patamares nunca vistos (Vörösmarty *et al.*, 2000), impondo, dessa forma, um desafio para as autoridades nacionais e globais sobre como prover água em quantidade e qualidade adequadas para essa população crescente. Esse desafio reflete também as evidências atu-

ais dos efeitos das mudanças climáticas como aquecimento dos oceanos (Rathore *et al.*, 2020), derretimento de geleiras (Bajracharya *et al.*, 2008), diminuição da cobertura de neve (Pulliainen *et al.*, 2020), elevação do nível do mar (Nerem *et al.*, 2018), dentre outros que afetam social, política e economicamente o mundo.

Ao considerar a breve exposição sobre as potenciais modificações que as mudanças climáticas causarão no ciclo hidrológico global, é quase impossível não se perguntar sobre quais serão as consequências de tais alterações na disponibilidade hídrica para as populações de todo o planeta. Uma das formas mais utilizadas para avaliar tais impactos tem sido estudos que propõem quantificar como as vazões de rios serão alteradas pelas mudanças climáticas projetadas para as próximas décadas (Schewe *et al.*, 2014).

Um dos maiores desafios para a modelagem do sistema terrestre através dos MSTs é a representação do ciclo hidrológico terrestre (Blöschl; Montanari, 2010; Lehner *et al.*, 2019). Isso ocorre porque a superfície terrestre é altamente heterogênea, sendo necessário uma grande quantidade de informações quanto aos tipos de solo, vegetação e relevo que, junto ao clima, compõem o ciclo hidrológico. Adicionalmente, tais modelos não representam redes de drenagem de rios, e sua resolução espacial é muito grande para que seja utilizada em estudos regionais de recursos hídricos. Dessa forma, os resultados dos MSTs devem ser utilizados com muita cautela, e não de forma direta (Lehner *et al.*, 2019; Krysanova *et al.*, 2018) quando se buscam respostas locais sobre o futuro dos recursos hídricos.

Para contornar esses obstáculos, muitos dos estudos de impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos baseiam-se em modelos hidrológicos complexos (Krysanova *et al.*, 2018), que são modelos capazes de reproduzir o ciclo hidrológico terrestre com maior realismo, permitindo, assim, que previsões de vazões em trechos de rios ou exutórios de bacias hidrográficas sejam feitas. Para a sua utilização, modelos hidrológicos necessitam de dados ambientais como precipitação, radiação, temperatura etc. Quando empregados para a projeção de impactos de mudanças climáticas, os modelos hidrológicos utilizam como dados de entrada as variáveis ambientais projetadas pelos MSTs (Krysanova *et al.*, 2018) para climas futuros.

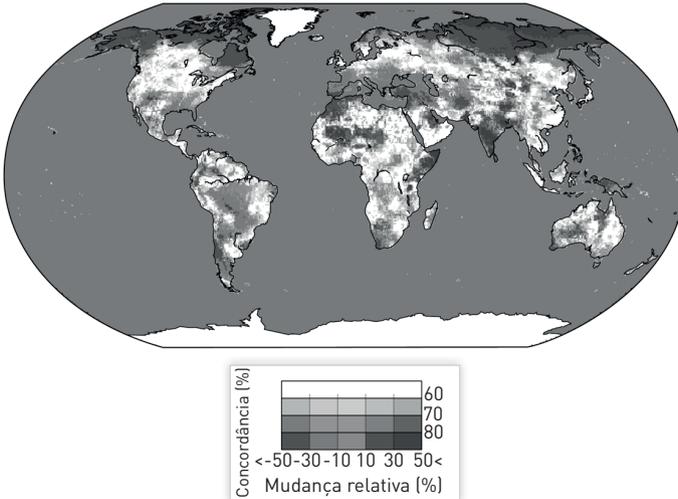
Apesar de serem amplamente utilizados, modelos hidrológicos introduzem um grau adicional de complexidade no processo de projeções de disponibilidade hídrica. Isso ocorre, pois o processo de modelagem hidrológica é feito de maneira “off-line” (Milly; Dunne, 2016), isto é, as variáveis ambientais dos MSTs são utilizadas como dados de entrada de modelos hidrológicos. A utilização de dois modelos de natureza distintas em cadeia pode levar a resultados errôneos caso os resultados de um (fluxos previstos pelos modelos hidrológicos regionais) não sejam comparáveis com os resultados do outro (fluxos previstos pelos modelos globais atuando em grandes escalas) (Milly; Dunne, 2017). Nesse caso, uma estratégia semelhante àquela utilizada para lidar com a incerteza dos MSTs em projeções globais é utilizada, na qual se busca utilizar o maior número de combinações possíveis entre modelos hidrológicos e projeções (MSTs) em conjunto (ex. Zaninelli *et al.*, 2019, Brêda *et al.*, 2020; Brêda *et al.*, 2023), possibilitando assim uma análise dos resultados em que os graus de concordância passam a representar, de maneira geral, a probabilidade de tais resultados acontecerem.

A Figura 4 foi gerada a partir de um estudo (Schewe *et al.*, 2014) em que variáveis ambientais extraídas de diversos MSTs foram utilizadas em conjunto com diversos modelos hidrológicos globais. Assim, é possível obter uma estimativa robusta das condições hídricas em cenários de mudanças climáticas. Por se tratar de um estudo compreensivo, publicado em um veículo de alta relevância científica, iremos tratar seus resultados com mais detalhes. Em primeiro lugar, pode-se perceber diversas áreas em branco, especialmente ao norte do continente Norte-Americano, Austrália, diversas regiões da África e Europa, além de regiões centrais e do Nordeste do Brasil. Essas áreas receberam tal classificação, pois os diversos modelos utilizados demonstraram um grau de concordância menor do que 60% quanto à direção da mudança: aproximadamente metade dos resultados apontaram para um acréscimo das vazões, enquanto a outra metade apontaram para um decréscimo. Em segundo lugar, pode-se perceber diversas áreas do globo em que as projeções demonstram uma concordância quanto ao aumento das vazões dos rios, como em grandes porções localizadas em altas latitudes do Hemisfério Norte, África Subsaariana, Índia e extensas áreas da China e Mongólia. Em contrapartida, amplas frações do planeta, encontradas

em regiões de latitudes médias, enfrentarão reduções das vazões, como as Américas do Sul e do Norte, além de grande parte da Europa.

## 5. Projeções futuras de disponibilidade hídrica para o Brasil

O Brasil é um país com dimensões continentais e que está sujeito a diversos regimes climáticos. Essa incrível variedade de climas presente no nosso país é refletida na variedade dos ecossistemas brasileiros, que, por sua vez, estão interligados aos nossos recursos hídricos: se, por um lado, temos os caudalosos rios supridos por altos volumes de chuvas e com vegetação típica da floresta Amazônica, Mata Atlântica, Pantanal e Cerrado, por outro também temos os rios muitas vezes intermitentes, que ocorrem na região semiárida, caracterizada por baixa pluviosidade, curta estação de chuvas e vegetação típica da Caatinga.



**Figura 4. Mudança percentual das vazões anuais, considerando um aumento de temperatura de 2°C em relação ao período 1980-2010. Diferentes cores denotam a intensidade das mudanças, enquanto a intensidade das mesmas está relacionada ao grau de concordância entre as diferentes projeções obtidas. Neste estudo foram utilizados 11 modelos hidrológicos globais e 5 MSTs**  
Fonte: Adaptado IPCC (2014).

É muito difícil não se questionar sobre quais mudanças poderão ocorrer nos regimes hídricos de diversas bacias hidrográficas brasileiras devido às mudanças climáticas relacionadas ao fenômeno do aquecimento global, cujas ocorrências estão cada vez mais presentes. O ciclo da água tem sido intensificado com as mudanças climáticas. Como apresentado, um aumento na intensidade da evaporação tende a gerar secas, mas também pode motivar a ocorrência de chuvas extremas devido ao aumento da retenção de vapor d'água pelo o ar aquecido. De acordo com o sexto relatório do IPCC (IPCC, 2021), a frequência de inundações já aumentou, em média, cerca de 30%. No Brasil, por exemplo, o hemisfério sul enfrentou a maior crise hídrica do registro histórico no ano de 2021, enquanto a região norte registrava cheias históricas.

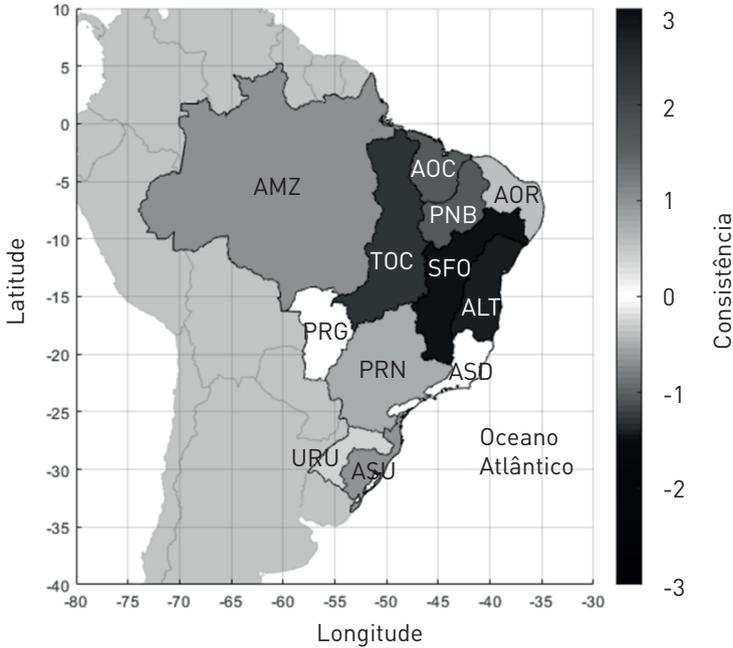
Uma redução da disponibilidade hídrica em diversas regiões pode levar a danos para a produção de alimentos e até mesmo para a saúde humana. Diversas doenças de veiculação hídrica (ex: leptospirose e leishmaniose) ou transmitidas por vetores (ex: dengue) podem ser agravadas no país como consequências das ocorrências de cheias e secas, as quais comprometem a qualidade da água de abastecimento (Confalonieri, 2003; Freitas *et al.*, 2014).

O entendimento de tais mudanças é de importância crucial para diversos setores estratégicos do país, como o setor hidrelétrico, agricultura, navegação fluvial e abastecimento urbano. Tendo isso em mente, diversos estudos foram realizados nas últimas duas décadas e continuam a serem produzidos no âmbito da previsão da disponibilidade hídrica em cenários de mudanças climáticas para o Brasil (Adam; Collischonn, 2013; Viola *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2017; Schuster; Fan; Collischonn, 2019; Schuster *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2019; Andrade *et al.*, 2020; Brêda *et al.*, 2020; Lucas-Borja *et al.*, 2020).

No entanto, como foi comentado antes, tais estudos estão sujeitos a diversas incertezas que precisam ser propriamente levadas em consideração. Um recente estudo (Borges de Amorim; Chaffê, 2019) procurou quantificar as incertezas das projeções de mudanças climáticas nos recursos hídricos nacionais ao analisar os principais achados até então publicados pela comunidade científica sobre o assunto. De-

vido a abrangência de tal estudo, iremos apresentar aqui um resumo de seus resultados. Nessa pesquisa, os autores classificaram os vários estudos analisados quanto à sua qualidade e procuraram definir o grau de consistência em relação aos achados. A Figura 5 foi adaptada do referido trabalho (Borges de Amorim; Chaffe, 2019) e resume o nível de consistência quanto às mudanças das vazões médias em cada macrorregião hidrográfica brasileira: regiões em azul representam valores de consistência positivos na disponibilidade hídrica superficial (maiores vazões), enquanto regiões em vermelho representam mudanças negativas (menores vazões). Valores absolutos entre 0 e 3 estão associados ao grau de concordância entre os diversos modelos utilizados nas projeções, em que 0 representa resultados inconclusivos e 3 representa concordância de 85% ou mais entre todas as simulações utilizadas. Podemos ver que as pesquisas apontam para uma possível redução da disponibilidade hídrica na maior parte do país, com exceção do extremo sul, onde mudanças positivas são esperadas. É também interessante notar que as regiões do Paraguai (PAR) e Atlântico Sudeste (ASD) apresentaram resultados inconclusivos.

As mudanças climáticas globais apresentadas aqui não são os únicos fatores que podem levar a alterações do balanço hídrico. É importante ressaltar que mudanças de uso da terra em larga escala podem alterar o clima local (IPCC, 2019) e os recursos hídricos (Moors; Dolman, 2003). Um exemplo da influência das mudanças de uso do solo no clima e no ciclo hidrológico regional pode ser observado na região do Cerrado brasileiro, onde tem sido sugerido que a derrubada da vegetação nativa e sua substituição para campos de plantio e criação de animais vem acarretando um aumento dos fluxos de evapotranspiração (Oliveira *et al.*, 2014). Tal fenômeno pode estar ocorrendo porque áreas anteriormente cobertas por vegetação nativa agora são sujeitas a agricultura irrigada, o que leva a um aumento da água disponível para a evaporação dos solos e através da transpiração de plantas.



**Figura 5. Mudanças em vazões médias em diferentes regiões hidrográficas brasileiras. Em vermelho, mudanças negativas (diminuição das vazões médias); em azul, mudanças positivas (aumento das vazões médias); e em branco resultados não conclusivos. Siglas das regiões hidrográficas: AMZ – Amazônia; TOC – Tocantins-Araguaia; PAR – Paraguai; AOC – Atlântico Nordeste Ocidental; PNB – Parnaíba; AOR – Atlântico Nordeste Oriental; SFO – São Francisco; ALT – Atlântico Leste; ASD – Atlântico Sudeste; PRN – Paraná; URU – Uruguai; ASU – Atlântico Sul**

Fonte: Adaptado de Borges de Amorim; Chaffe (2019).

As alterações de cobertura vegetal também podem ocorrer como consequência das mudanças climáticas, como aponta o estudo de Salazar, Nobre e Oyama (2007). Segundo os autores, os modelos climáticos globais do IPCC-AR4 e modelos regionais apontam tendência de

aumento da temperatura na faixa de 2 a 6°C até 2100 na América do Sul. Esse aumento da temperatura pode intensificar a evapotranspiração e, conseqüentemente, reduzir a quantidade de água no solo. Logo, pode haver substituição de biomas por outros tipos de vegetação mais adaptadas à menor quantidade de água no solo, como a redução das áreas de cobertura de florestas tropicais e a substituição por savanas. Essas alterações da cobertura vegetal em função das mudanças climáticas podem impactar negativamente não apenas a disponibilidade hídrica da região, mas também a diversidade ecológica das plantas e animais.

A construção de reservatórios para armazenamento de água com fins agrícolas pode, também, estar contribuindo para o aumento das taxas de evaporação em tais áreas. Outro exemplo de relevância em território nacional é o aumento de vazões em rios localizados no chamado “arco do desmatamento” ao sul da Amazônia (Levy *et al.*, 2018). Tal aumento de vazões estaria associado a diminuição dos fluxos de evapotranspiração devido à remoção de áreas de floresta.

Por outro lado, os efeitos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico de bacias hidrográficas podem afetar a geração de energia elétrica. Como exemplo, Lima, Collischonn e Marengo (2014) mostraram que as projeções para o período de 2071 a 2099 com base no modelo Eta-20 (CT20) indicam reduções de vazão em quase todas as usinas do sistema elétrico brasileiro localizadas ao norte do paralelo 20°S, como é o caso das usinas existentes ao longo do rio Paranaíba, um dos formadores do rio Paraná, e aumentos da vazão média em quase todas aquelas localizadas ao sul do paralelo 20°S, como é o caso das usinas do rio Grande, outro formador do rio Paraná.

Outro estudo recente utilizando modelagem hidrológica e dados de 25 MCG para os RCP 4.5 e RCP 8.5 (Brêda *et al.*, 2020) avaliou o efeito das mudanças climáticas projetadas para o final do século (2081 - 2100), mostrando redução da precipitação e do escoamento na maior parte da América do Sul. O estudo mostra tendência de grandes reduções na vazão média anual para as bacias Orinoco, Tocantins e Amazonas, e uma tendência de aumento da vazão média na bacia do Uruguai. Essas informações são importan-

tes para mitigar impactos futuros das alterações climáticas e devem ser consideradas, entre outras, no planejamento reservatórios de abastecimento, expansões agrícolas e de usinas hidroelétricas.

## 6. Recursos hídricos no Espírito Santo

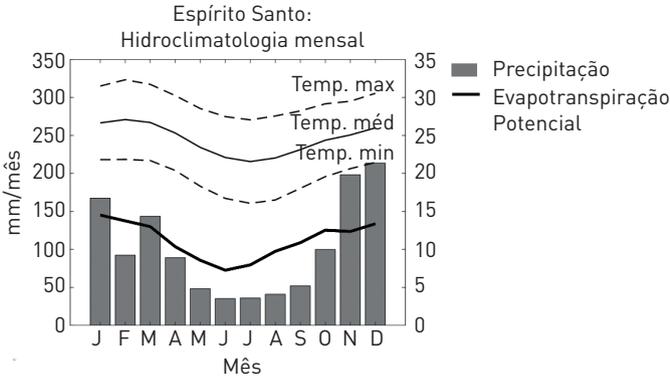
Assim como em diversas localidades do país, os recursos hídricos cumprem um papel estratégico para o desenvolvimento do Espírito Santo: a sua utilização é de grande importância para o crescimento da economia através do abastecimento das cidades com água potável, assim como na indústria e mineração, setores de grande crescimento no (Espírito Santo, 2012). Cabe destacar que o setor econômico responsável pelo maior consumo de água no estado é o agropecuário, representando aproximadamente 94% da demanda de água no Estado. Tal valor está acima da média nacional (Ana, 2019), de aproximadamente 80% e da média global (FAO-Aquastat, 2020) de 70% o que ressalta a importância do setor para o estado.

Podemos entender um pouco sobre os recursos hídricos do Espírito Santo ao analisarmos algumas variáveis importantes que controlam os recursos hídricos locais. A Figura 6 exibe valores médios mensais entre os anos de 1980-2015 para todo o Estado. Em azul, temos os valores médios mensais de precipitação ( $P$ , em milímetros de chuva), ao mesmo tempo em que são exibidos os valores médios mensais das temperaturas máxima, mínima e média. A linha vermelha na Figura 5 representa os valores mensais médios de Evapotranspiração Potencial ( $E_{pot}$ ), que é definido como o valor máximo que se pode evaporar da superfície terrestre durante um certo período de tempo (ano, mês ou dia). Esta variável leva em conta os valores de temperatura, umidade e velocidade do vento de um certo local e é utilizada como uma estimativa da demanda hídrica atmosférica, imposta pelas condições climáticas existentes no local de interesse. A diferença entre os valores mensais de precipitação e evapotranspiração potencial, ajudam a identificar períodos de déficit ( $P < E_{pot}$ ) ou excedente ( $P > E_{pot}$ ) hídrico.

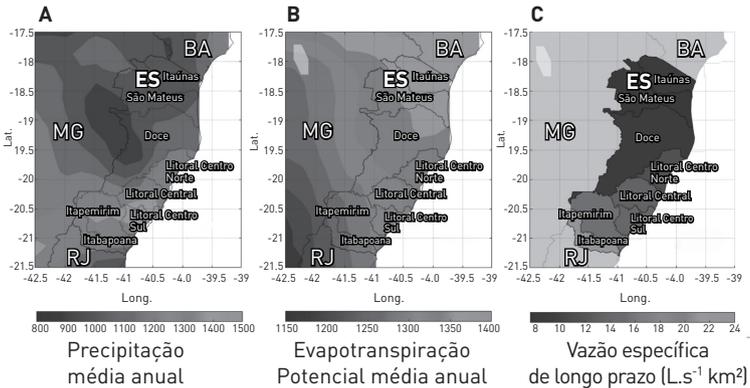
A análise do Estado como um todo não é suficiente para se entender as diferenças locais de disponibilidade hídrica encontradas no Espírito Santo. Apesar de sua dimensão reduzida se comparado com demais estados brasileiros, o Espírito Santo possui grande variabilidade hidroclimatológica, o que por sua vez é refletido em grandes contrastes na disponibilidade hídrica superficial.

A **Figura 7** exhibe os padrões espaciais hidroclimatológicos ao longo do Estado. Nessa figura o Estado está dividido em Unidades de Gestão de Recursos Hídricos (UGRH's), unidade espacial pela qual levantamentos e projeções dos recursos hídricos são feitos para o estado. A **Figura 7a** mostra a distribuição espacial dos valores anuais médios de precipitação, e pode-se perceber uma grande diferença entre o norte e o sul do Estado: enquanto partes da região sul possuem precipitação anual média de 1500 mm por ano (exemplo: UGRH's do Itapemirim e Litoral Centro Sul), as regiões das UGRH's Itaúnas, São Mateus e partes da UGRH do rio Doce, por sua vez, recebem em média por volta de 1000 mm. A **Figura 7b** expõe valores anuais médios de evapotranspiração potencial. Novamente, um padrão norte-sul é aparente, porém de comportamento inverso ao da precipitação, com valores crescentes do sul ao norte.

Essa breve comparação nos mostra o contraste existente entre os padrões hídricos de oferta (precipitação) e demanda (evapotranspiração potencial) atmosférica no estado: as regiões que menos recebem chuvas ao longo do ano estão sujeitas também às maiores perdas por evapotranspiração. Como é de se imaginar, tal contraste terá repercussões claras nas vazões de rios, como se pode ver na **Figura 7c**, onde a vazão específica de longo prazo por UGRH. Estes valores foram obtidos pela soma das vazões médias de longo termo (QMLT) dos trechos de rios inseridos em cada UGRH, dividida pela área de cada UGRH. Ao ser calculada como a média em períodos de 20 a 30 anos, a QMLT representa o comportamento médio dos rios numa escala temporal equiparável à climatológica (entre 20 e 30 anos). A **Figura 7c** mostra um resultado que, de certa forma, era esperado, exemplificado pela disponibilidade na UGRH de Itabapoana ( $22.75 \text{ l.s.km}^{-1}$ ), no extremo sul, é cerca de três vezes maior que a disponibilidade da UGRH de São Mateus ( $7.85 \text{ l.s.km}^{-1}$ ), ao norte do estado.



**Figura 6. Valores mensais médios de algumas variáveis hidroclimató-lógicas para o Espírito Santo**  
Fonte: Elaboração própria.

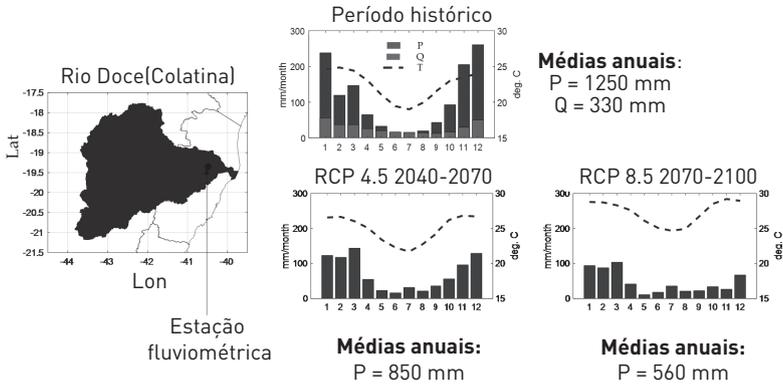


**Figura 7. Padrões hidroclimatólogicos do estado do Espírito Santo.** (a) - distribuição espacial da precipitação média anual; (b) - distribuição espacial da evapotranspiração potencial ( $E_{pot}$ ); (c) - distribuição espacial da vazão específica de longo prazo. Nessa figura, o estado está dividido em suas unidades de gestão de recursos hídricos (UGRH). A figura acima foi gerada com base em uma base de dados de variáveis climatológicas disponíveis para o Brasil

Fonte: Xavier, King e Scanlon (2016).

Uma vez traçado o breve panorama sobre recursos hídricos possíveis questões sobre o futuro dos recursos hídricos (nesse caso, a disponibilidade hídrica superficial) no estado podem ser levantadas. Em primeiro lugar, é necessário avaliar se, e como, as mudanças climáticas irão afetar distribuição da precipitação no Estado: a região Centro-Ceste e Norte continuarão com as mesmas médias anuais, se tornarão mais secas ou mais úmidas? O mesmo raciocínio pode ser feito sobre a região Sul, mais úmida. Em segundo lugar, é importante lembrar que o aumento das temperaturas globais é um dos resultados mais antecipados das mudanças climáticas e sobre o qual existe o maior grau de confiabilidade (IPCC, 2014). Uma atmosfera mais quente certamente incorrerá em maiores taxas de demanda atmosférica, que, por sua vez, poderá afetar as vazões dos rios. Outros fatores que também controlam a evapotranspiração dos continentes (velocidade dos ventos, umidade, radiação solar e vegetação existente) também precisam ser levados em consideração em estudos regionais para um maior entendimento dos possíveis impactos.

A breve análise a seguir pode nos ajudar a entender o futuro dos recursos hídricos do estado em relação a uma de suas bacias hidrográficas mais importantes. A **Figura 8** mostra algumas projeções de importância sobre o ciclo hidrológico no fim do século na Bacia do Rio Doce. No painel superior, são exibidas as médias mensais históricas (1980-2013) de chuvas e vazões em milímetros por mês, além das temperaturas médias observadas. No painel inferior, estão destacadas as projeções das médias mensais de temperatura e precipitação para o fim do século (2070-2100).



**Figura 8. Comparação entre algumas variáveis período histórico (1980 - 2015) e futuro para a Bacia do Rio Doce (referente à estação de medições de vazões em Colatina)**

Fonte: Elaboração própria.

As projeções em destaque se referem aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do 5º Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (Church, 1996) e foram extraídas do modelo regional ETA (Chou *et al.*, 2014) aninhado ao modelo HADGEM-ES. Os resultados indicam uma forte redução da precipitação mensal ao longo de todo o ano para a bacia em questão, além do aumento das temperaturas mensais. É importante destacar que, ao contrário do período histórico, os painéis inferiores não exibem as vazões projetadas para a bacia em pauta, pois os modelos regionais possuem grande incerteza em relação a essa variável. Entretanto, é possível articular que, de acordo com o modelo utilizado nesta análise, tal combinação de baixas precipitações e altas temperaturas irá, invariavelmente, acarretar numa diminuição drástica da disponibilidade hídrica da bacia, significando um grande desafio para a gestão de recursos hídricos do estado.

Outra abordagem para investigar os efeitos das mudanças climáticas nas vazões tem sido com o uso de modelagem hidrológica. Desta forma, para avaliar esse comportamento futuro das vazões projetadas para a bacia do rio Doce, apresentaremos a seguir um estudo de caso envolvendo modelagem hidrológica com uso de dados de modelos climáticos para avaliação da variabilidade de vazões.

A discussão iniciada aqui representa apenas uma breve exposição dos possíveis impactos de longo prazo nos recursos hídricos do ES, uma vez que muitos outros aspectos hidroclimatológicos e locais precisam ser avaliados. Análises de valores totais anuais de precipitação futura e de demanda atmosférica não nos dizem, por exemplo, se haverá mudanças na sazonalidade das chuvas, o que é de grande importância para o setor agrícola. Outro importante aspecto a se discutir é como as mudanças climáticas irão afetar a intensidade das chuvas, uma vez que chuvas intensas estão ligadas à erosão hídrica e à perda do solo impactando assim a produção agrícola, além de poderem gerar cheias e deslizamentos, eventos de consequências econômicas e sociais catastróficas.

## 7. Estudo de Caso

Como visto nos itens acima, um aumento de temperatura traz como uma das consequências o aumento da frequência de eventos extremos, como tempestades e secas prolongadas, uma vez que altera o ciclo hidrológico, alterando os padrões de precipitação (Marengo, 2001; Marengo, 2008). Períodos secos mais intensos comprometem o abastecimento de água de uma região, especialmente quando esse abastecimento provém da captação em mananciais superficiais cujas vazões tendem a ser reduzidas com uma diminuição da precipitação. Portanto, uma avaliação dos efeitos das mudanças climáticas nas vazões pode contribuir na busca por estratégias de mitigação e adaptação em bacias hidrográficas quanto às projeções futuras.

Desta forma, este estudo de caso buscou avaliar os impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do rio Doce, localizada nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais, utilizando o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB (Collischonn; Tucci, 2001; Collischonn *et al.*, 2007, Pontes *et al.*, 2017), desenvolvido para simular o processo de transformação de chuva em vazão de forma distribuída em grandes bacias hidrográficas (áreas maiores que 1.000 km<sup>2</sup>), e as projeções futuras do MCR Eta (Marengo *et al.*, 2011). Detalhes sobre o estudo realizado podem ser obtidos em (Dela Costa, 2021).

## 7.1 Área de Estudo

A bacia do rio Doce está localizada no sudeste brasileiro, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste entre as latitudes  $17^{\circ}45'$  e  $21^{\circ}15'$  S e as longitudes  $39^{\circ}30'$  e  $43^{\circ}45'$  W com área de drenagem de  $83.465 \text{ km}^2$ , dos quais 86% estão no estado de Minas Gerais e 14% no Espírito Santo (Coelho, 2007). O rio Doce tem extensão de 879 quilômetros e suas nascentes estão em Minas, nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço, sendo o maior rio do estado do Espírito Santo e um dos mais importantes do país. A bacia hidrográfica do rio Doce e os seus principais afluentes são apresentados na Figura 9.



**Figura 9. Localização da bacia do rio Doce e seus principais afluentes**  
Fonte: Elaboração própria.

A bacia do rio Doce está inserida em uma região de clima tropical úmido, sendo marcada por heterogeneidade climática, a qual se

deve a fatores como posição geográfica, características de relevo e do encontro de massas de ar que atuam no interior da bacia, como é o caso do Sistema Tropical Atlântico, que prevalece em grande parte do ano, e do Sistema Equatorial Continental, ocasionando Linhas de Instabilidade Tropical, que provocam chuvas intensas predominantemente no verão (Coelho, 2009).

Em função do rápido crescimento econômico não sustentável, a bacia tem sofrido diversos impactos ambientais significativos decorrentes da exploração indevida dos recursos naturais. Associados aos fenômenos meteorológicos, a retirada da vegetação nativa tem contribuído para as inundações, especialmente a partir do século XIX devido ao plantio de café e cana-de-açúcar, exploração de madeira e formação de pastagem, que modificaram a capacidade de infiltração e o armazenamento do solo, agravando os efeitos das chuvas intensas (PIRH-Doce, 2010).

## ***7.2 Abordagem para a modelagem***

Nesse estudo, o modelo MGB foi aplicado com a propagação inercial de vazões implementada por Pontes *et al.* (2015) e Pontes *et al.* (2017). Essa versão representa melhor regiões muito planas e com drenagem complexa.

Inicialmente o modelo MGB teve seus parâmetros calibrados, no período de 1990 a 2014, e validados, no período de 1970 a 1989, utilizando séries históricas de dados hidrológicos e meteorológicos diários. Dados de vazão e precipitação foram obtidos a partir de séries históricas diárias de 62 estações fluviométricas e 101 pluviométricas, respectivamente, pertencentes a base de dados Agência Nacional de Águas (ANA), obtidos através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) e disponíveis em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Os dados meteorológicos mensais utilizados no modelo foram normais climatológicas (1961-1990), disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2019), que consistem em dados de temperatura, umidade, insola-

ção (horas de sol por dia), velocidade do vento e pressão. Os dados de precipitação e os demais dados meteorológicos são dados de entrada do MGB, já os dados de vazão foram utilizados para avaliação da calibração e da validação do MGB para a bacia do rio Doce.

As vazões simuladas foram comparadas com as vazões observadas nas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas utilizando as estatísticas de desempenho coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016) e o erro relativo de volume total (Gupta; Sorooshian; Yapo, 1999).

Para a avaliação do impacto das mudanças climáticas foram utilizados dados de precipitação e clima das projeções do MCR Eta (Marengo *et al.*, 2011) forçado pelos MCG BESM (Nobre *et al.*, 2013), Miroc5 (Watanabe *et al.*, 2010), CanESM2 (Arora *et al.*, 2011) e HadGEM2-ES (Collins *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2011) com resolução espacial de 20 km e passo de tempo diário, denominadas neste trabalho como Eta-BESM, Eta-MIROC5, Eta-CanESM2 e Eta-HadGEM2-ES 20 km, considerando o cenário climático futuro RCP 8.5 (Van Vuuren *et al.*, 2011). Foi aplicado o escalonamento linear para correção de viés das séries das variáveis climáticas do MCR Eta, com base em dados observados de precipitação e dados do *Climatic Research Unit - CRU* (NEW *et al.*, 2002). As simulações do MCR Eta, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe / CPTEC), tiveram sua performance avaliada em pesquisas, como Almagro *et al.* (2020), Chou *et al.* (2014b), Lyra *et al.* (2017).

Após a correção de viés para o período futuro, as projeções do MCR Eta foram utilizadas como dados de entrada do modelo MGB para estimar as vazões nos períodos futuros de 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2099.

### 7.2.1 Representação da bacia no MGB

No MGB, a bacia hidrográfica é discretizada em unidades menores interconectadas chamadas de minibacias, que são peque-

nas áreas de contribuição para cada trecho de rio correspondente, onde ocorrerá a propagação de vazão. As minibacias são definidas em função do Modelo Digital de Elevação (MDE) e divididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que consistem na combinação de mapas de tipos do solo e mapas de cobertura vegetal ou uso da terra. As Unidades de Resposta Hidrológica (URH) são regiões de comportamento hidrológico similar.

A discretização da bacia hidrográfica foi realizada utilizando a ferramenta IPH-Hydro Tools (Siqueira *et al.*, 2016), com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução espacial de 90 metros, disponibilizado pela NASA em <https://bit.ly/3Mfy7kz>. Ao total foram geradas 1488 minibacias e, conseqüentemente, este mesmo número de trechos de rios formando a rede de drenagem simulada.

A bacia ainda foi subdividida em 60 sub-bacias, com base na localização das estações fluviométricas, para as quais foram definidos valores dos parâmetros do modelo para cada uma URH. O mapa de URH utilizado foi o desenvolvido por Fan *et al.* (2015) para toda a América do Sul, o qual foi recortado para a bacia do rio Doce.

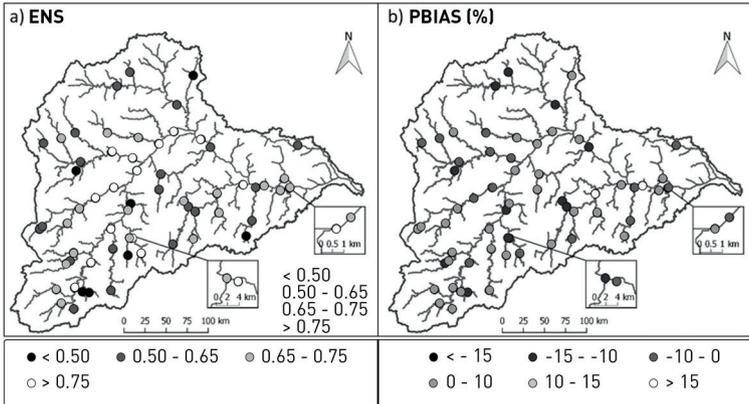
## **7.3 Resultados**

### *7.3.1 Calibração e validação do modelo MGB*

Os resultados da calibração e da validação do modelo MGB foram avaliados por meio das estatísticas de desempenho e hidrogramas de vazões diárias simuladas e observadas. Na Figura 10 estão dispostos os parâmetros estatísticos calculados para o período de calibração (1990 - 2014) nos diversos pontos da bacia, nos quais há estações com dados observados de vazão.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E_{ns}$ ) (Figura 10a) apresentou valores superiores a 0,75 e a 0,50 em 24% e 89% das estações, respectivamente. O  $E_{ns}$  (Figura 10b) indica que em 55% das estações as vazões médias foram superestimadas em menos de 10%, ao passo que em 24% das estações elas foram subestimadas em me-

nos de 10%. A tendência de superestimação entre as vazões médias simuladas e observadas foi superior a 15% somente em 3% das estações, não havendo subestimação maior que -15%.



**Figura 10. Distribuição espacial das estatísticas de desempenho calculadas para a vazão no período de calibração do modelo MGB (1990 - 2014) aplicado à bacia do rio Doce**

Fonte: Elaboração própria.

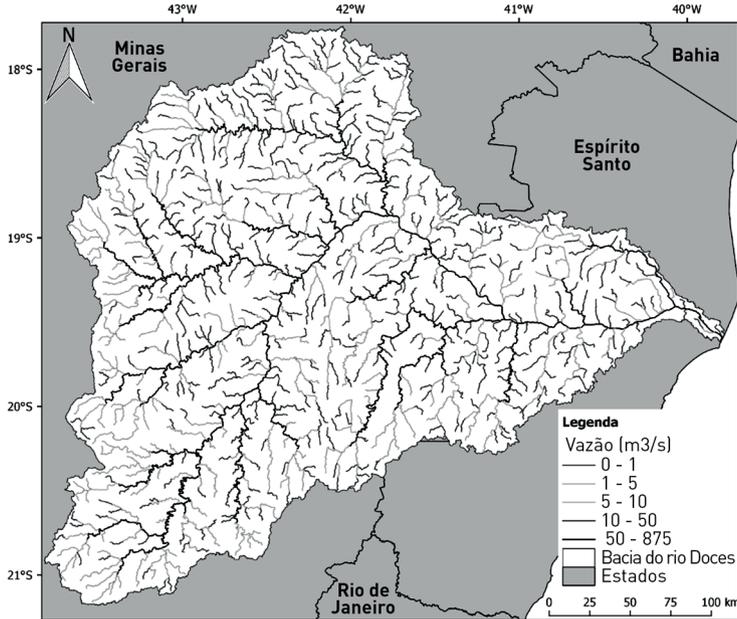
A partir dos resultados obtidos na calibração e na validação, verifica-se que o modelo MGB representou adequadamente as vazões observadas e, conseqüentemente, apresentou resultados considerados adequados para ser aplicado na avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas vazões da bacia do rio Doce.

### 7.3.2 Impacto das Mudanças Climáticas na Vazão

A partir das projeções dos modelos climáticos utilizados foram simuladas séries futuras de vazão em cada um dos trechos de drenagem da discretização da bacia do rio Doce. Os resultados apresentados a seguir correspondem aqueles do pior cenário de mudanças climáticas (RCP 8.5).

A **Figura 11** apresenta a vazão média anual [ $m^3/s$ ] simulada nos trechos de rio da bacia do rio Doce, para o período base (1998 - 2014). Uma avaliação da distribuição espacial das tendências da vazão

na bacia do rio Doce foi realizada com base na variação relativa da vazão média anual ao longo do século XXI em relação à vazão média anual do período base (1998 - 2014) em cada trecho de rio simulado.

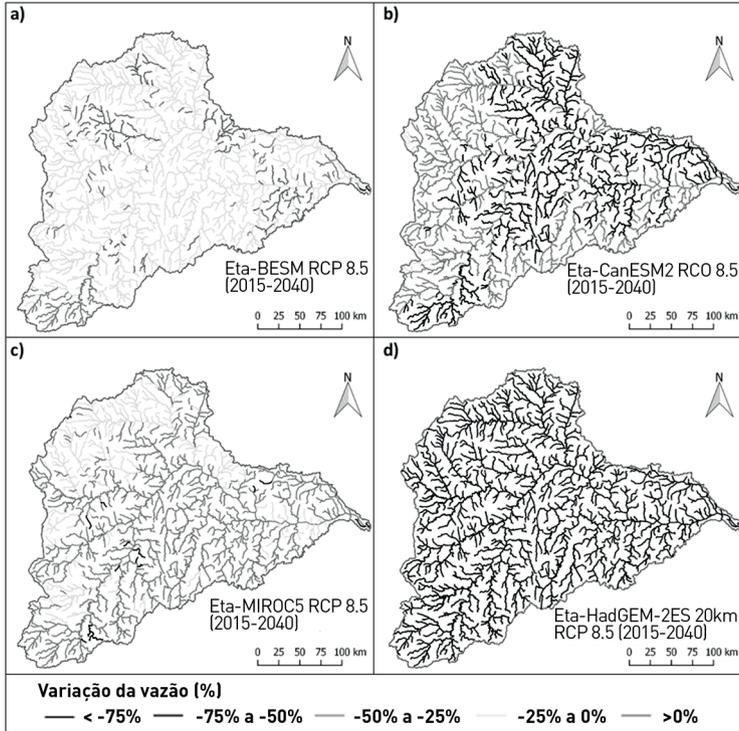


**Figura 11. Distribuição da vazão média anual [m<sup>3</sup>/s] simulada nos trechos de rio da bacia do rio Doce, para o período base (1998-2014)**

Fonte: Elaboração própria.

As variações relativas das vazões simuladas com projeções dos modelos utilizados para o cenário climático RCP 8.5 são apresentadas por meio de mapas em 2015 - 2040 (Figura 12), 2041 - 2070 (Figura 13) e 2071 - 2099 (Figura 14). De modo geral, todos os modelos sugerem redução das vazões médias no período 2015-2040, embora as tendências de variação sejam mais otimistas considerando as projeções do Eta-BESM e mais severas com as projeções do Eta-HadGEM2-ES. Em cerca de 75% dos trechos de rios as vazões médias anuais simuladas com as projeções do Eta-BESM tendem a apresentar reduções menores que -17%, enquanto que nos demais trechos verifica-se possi-

bilidade de aumento da vazão média. Por outro lado, as vazões médias anuais simuladas com base nas projeções do Eta-HadGEM2-ES mostram reduções maiores que -74%, a maioria dos trechos simulados.

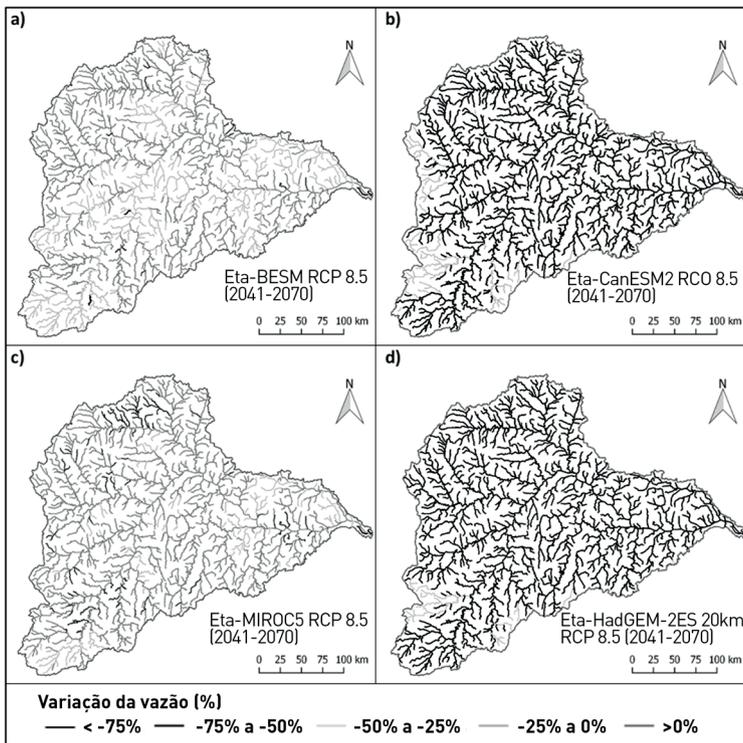


**Figura 12. Variação percentual da vazão média anual simulada com projeções dos modelos (a) Eta-BESM, (b) Eta-CanESM2, (c) Eta-MIROC5 e (d) Eta-HadGEM2-ES 20 km, sob o RCP 8.5, no período de 2015 - 2040, em relação à vazão média anual do período base (1998 - 2014)**

Fonte: Elaboração própria.

Embora os modelos considerados neste estudo sugiram redução das vazões médias até o fim do século XXI, em grande parte como consequência da redução da precipitação média, as magnitudes das variações são distintas entre eles. Por exemplo, no período de 2041 a 2070 (**Figura 13**), os resultados indicam que as vazões futuras si-

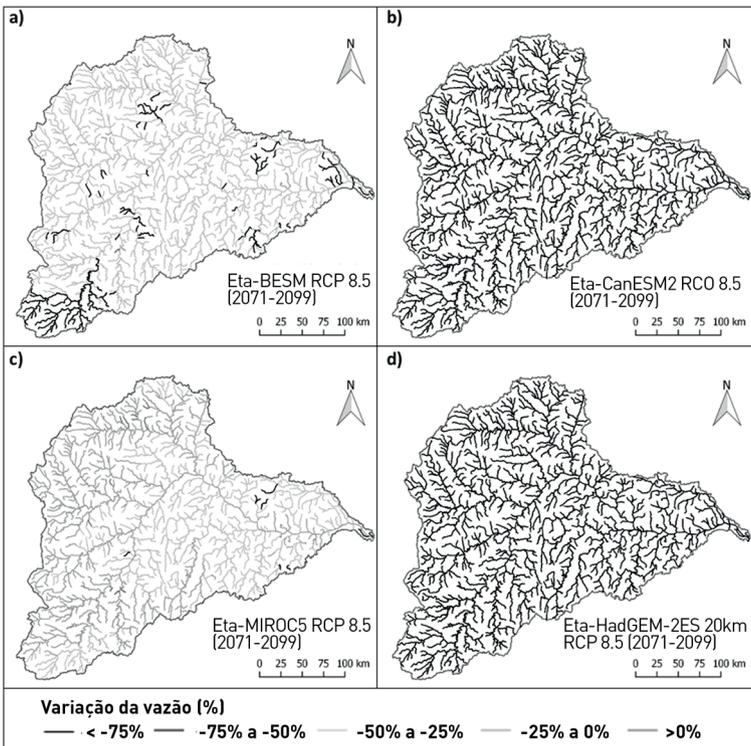
muladas com as projeções do Eta-MIROC5 apresentam as menores tendências de redução (menos que -20% em 75% dos trechos de rios) em toda a bacia do rio Doce, exceto em poucos trechos de rio em especial na cabeceira da bacia do rio Suaçuí Grande, enquanto que as projeções futuras do Eta-CanESM2 e do Eta-HadGEM2-ES indicam as tendências de redução mais rigorosas do período (maiores que -55% e -60%, respectivamente, em 75% dos trechos de rios). Interessante ainda destacar que as variações projetadas com o Eta-HadGEM2-ES são menos rigorosas neste período do que no período de 2015-2014 e 2071-2099, embora ainda mais pessimistas do que os demais modelos.



**Figura 13. Variação percentual da vazão média anual simulada com projeções dos modelos (a) Eta-BESM, (b) Eta-CanESM2, (c) Eta-MIROC5 e (d) Eta-HadGEM2-ES 20km, sob o RCP 8.5, no período de 2041 – 2070, em relação à vazão média anual do período base (1998 - 2014)**

Fonte: Elaboração própria.

Para o período de 2071 – 2099 (Figura 14), observa-se que as vazões simuladas com as projeções do Eta-MIROC5 e Eta-BESM apresentam as tendências mais otimistas de redução (menores que -33% e -43%, respectivamente, na maioria dos trechos rios simulados), enquanto que as vazões simuladas com as projeções do Eta-CanESM2 e do Eta-HadGEM2-ES indicam as tendências mais pessimistas de redução de vazões médias, sendo menores que -74% em praticamente toda a bacia. Em quase toda a bacia as reduções projetadas com o Eta-BESM estão entre -25% e -43%, com alguns trechos apresentando redução maior que -50%.



**Figura 14. Variação percentual da vazão média anual simulada com projeções dos modelos (a) Eta-BESM, (b) Eta-CanESM2, (c) Eta-MIROC5 e (d) Eta-HadGEM2-ES 20km, sob o RCP 8.5, no período de 2071 – 2099, em relação à vazão média anual do período base (1998 - 2014)**

Fonte: Elaboração própria.

Buscando verificar o comportamento das vazões em locais específicos da bacia, foi feita ainda uma avaliação da variação relativa da vazão de permanência de 90% ( $Q_{90}$ ) nos períodos 2015 - 2040, 2041 - 2070 e 2071 - 2099, em relação ao período base (1998 - 2014), em nove pontos selecionados no rio Doce e seus afluentes (Figura 14): rio Piranga, rio Casca, rio Piracicaba, rio Santo Antônio, rio Suaçuí Grande, rio Caratinga, rio Manhuaçu, rio Guandu e no exutório da bacia. A vazão de referência  $Q_{90}$  é a vazão igualada ou superada em 90% do período de tempo analisado, e tem grande importância na gestão de recursos hídricos no Espírito Santo por ser considerada a vazão utilizada como referência para outorga no estado.



**Figura 15. Pontos de interesse na bacia do Doce para análise das vazões futuras**

Fonte: Elaboração própria.

A variação das vazões mínimas é importante, pois dela depende usos como abastecimento de água e geração de energia. Em especial para o Estado do Espírito Santo, a vazão de referência Q90 tem importância por ser uma vazão de referência na gestão de recursos hídricos. Neste sentido, este estudo verificou que a Q90 nos nove pontos selecionados no rio Doce e seus principais afluentes apresenta tendências de variação de 7% a -91% em 2041 - 2070, de -23% a -98% em 2071 - 2099. No período de 2041 a 2070, as tendências de redução da Q90 mais pessimistas são das simulações com as projeções do Eta-CanESM2 sob o RCP 8.5. Em 2071 - 2099, a Q90 pode sofrer reduções mais rigorosas de acordo com as projeções do Eta-CanESM2 sob RCP 8.5 e mais otimistas de acordo com as projeções do Eta-BESM sob o RCP 8.5.

Apesar de todos os modelos estudos indicarem redução das vazões média e  $Q_{90}$ , é importante destacar que as tendências das vazões futuras podem variar muito no início do século XXI em função dos modelos climáticos utilizados, além da localização da região de estudo, como identificado em diversos estudos em bacias hidrográficas brasileiras (Alvarenga *et al.*, 2016b; Oliveira *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2019; Andrade *et al.*, 2020; Schuster *et al.*, 2020).

Os resultados apresentados aqui mostram ainda que as variações nas vazões na bacia do rio Doce são sensíveis às alterações da precipitação, sendo esperadas reduções significativas de acordo com as projeções de determinados modelos.

## Conclusão

Este estudo avaliou a influência das projeções futuras das mudanças climáticas na vazão dos cursos hídricos da bacia do rio Doce, aplicando o modelo MGB com base no cenário climático RCP 8.5 e nas projeções dos MCR Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-MIROC5 e o Eta-HadGEM2-ES 20 km.

Os modelos climáticos e os cenários de clima futuros indicam que a bacia poderá sofrer graves problemas com reduções signifi-

cativas das precipitações futuras média anual e média nos períodos chuvoso e seco ao longo do século XXI.

Os resultados desse estudo indicam que a bacia do rio Doce poder ter problemas relacionados à redução das vazões nos três períodos futuros analisados. Apesar das simulações com as projeções dos modelos climáticos regionais mostrarem diferentes magnitudes de redução, ainda assim a redução é considerável. Por outro lado, em alguns cursos d'água pode haver pequeno aumento das vazões ao se considerar as do Eta-BESM e do Eta-MIROC5, especialmente a região mais ao norte da área de estudo.

O estudo mostrou que as tendências das vazões futuras podem variar muito em função dos modelos climáticos utilizados. Embora haja divergência no percentual de variação da  $Q_{med}$  e da  $Q_{90}$  nos períodos analisados, em sua maioria, as simulações com as projeções do MCR Eta mostram tendências elevadas de redução da  $Q_{med}$  e da  $Q_{90}$  nos afluentes e no rio Doce.

Por fim, os resultados deste estudo podem auxiliar no desenvolvimento de planos de gerenciamento dos recursos hídricos na bacia do rio Doce. Além disso, podem oferecer informações relevantes relacionadas à elaboração de ações de adaptação e mitigação aos impactos ocasionados pelas mudanças climáticas na bacia.

## **Considerações finais**

Neste capítulo vimos que o ciclo hidrológico tem sido influenciado pelas mudanças climáticas, resultando em alterações na frequência e na intensidade das chuvas e, conseqüentemente, causando diversos problemas ambientais relacionados aos recursos hídricos. É fato que conseqüências das mudanças climáticas relacionadas ao fenômeno do aquecimento global estão cada vez mais presentes, intensificando o ciclo da água. Conhecer como essas mudanças ocorrem é de importância crucial para diversos setores estratégicos do país, como o setor hidrelétrico, agricultura, navegação fluvial e abastecimento urbano.

Uma avaliação dos efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos pode fornecer informações relevantes para o desenvolvimento de planos de gerenciamento de recursos hídricos e da elaboração de estratégias de mitigação e adaptação em bacias hidrográficas. Como estratégia de avaliação de quais mudanças poderão ocorrer nos regimes hídricos de diversas bacias hidrográficas brasileiras devido às mudanças climáticas relacionadas ao fenômeno do aquecimento global, muitos dos estudos utilizam modelos hidrológicos, como foi exemplificado no estudo de caso apresentado.

Diante dessas alterações climáticas e modificações nos recursos hídricos, é preciso que as ações de planejamento futuro nos diversos setores reconheçam a necessidade de rever e reformular processos e práticas consagradas, pois características e padrões observados no passado não têm sido mais representativos do futuro. Especificamente na gestão de recursos hídricos, os prognósticos futuros que assumem um comportamento estacionário de clima, projetando cenários futuros com base no passado, podem ampliar as incertezas das suas ações. Portanto, há ainda um desafio de incorporar o conhecimento das modificações nos recursos hídricos aos diversos estudos, o que implica em ampliar cenários de possibilidades do que pode acontecer no futuro e o que precisa ser feito.

Ainda que haja evidências dos impactos das mudanças climáticas nas vazões futuras, a gestão das águas nem sempre tem levado em conta a mudança do clima para avaliar as disponibilidades hídricas futuras. No Espírito Santo, por exemplo, embora todas as bacias hidrográficas estejam contempladas com Planos de Bacias (AGERH, 2021), o impacto da mudança do clima na disponibilidade hídrica futura dificilmente tem sido considerado. Porém, o setor de recursos hídricos brasileiro tem avançado e buscado estratégias de adaptação às mudanças climáticas dentro do escopo do Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas, de forma a questão climática possa vir a ser contemplada em diversas ações como nos Planos Diretores Urbanos, Planos de Drenagem Urbana, Planos de Recursos Hídricos, entre outros.

## Referências

- ALLAN, Richard P. *et al.* Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. **Ann. N.Y. Acad. Sci.**, v. 1472, n. 1, p. 49-75, 2020.
- ALLAN, Richard P.; LIEPERT, Beate G. Anticipated changes in the global atmospheric water cycle. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, 025201, 2010.
- ALMAGRO, André *et al.* Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Recursos Hídricos. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2019**. Brasília, DF: ANA, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3Ur9SIR>. Acesso em: 1 jul. 2023.
- ARORA, Vivek K. *et al.* Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 5, p. 1-6, 2011.
- BLÖSCHL, Günter; MONTANARI, Alberto. Climate change impacts-throwing the dice? **Hydrological Processes**, v. 24, n. 3, p. 374-381, 2010.
- BORGES DE AMORIM, Pablo; CHAFFE, Pedro B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. **Climatic Change**, v. 155, p. 37-57, 2019.
- BRÊDA, João Paulo Lyra Fialho *et al.* Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. **Journal of Hydrology**. vol 619, 2023.
- BRÊDA, João Paulo Lyra Fialho *et al.* Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 503-522, 2020.
- BRIGHENTI, Tássia; BONUMÁ, Nadia; CHAFFE, Pedro. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.
- CHOU, Sin Chan *et al.* Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014.

CHURCH, Thomas. An underground route for the water cycle. **Nature**, v. 380, p. 579-580, 1996.

COELHO, André Luiz Nascentes. **Alterações hidrogeomorfológicas no MédioBaixo Rio Doce/ES**. 2007. 227f. Tese (Doutorado) – Curso de Geografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

COLLINS, William J. *et al.* Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011.

COLLISCHONN, Walter *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

DELA COSTA, Franciélli de Paula *et al.* Impacto das mudanças climáticas na vazão e descarga sólida em suspensão na bacia do rio Doce. *In: Encontro nacional de engenharia de sedimentos*, 14, 2020, Campinas. Anais. Campinas: ABRH, 2020.

DELA COSTA, Franciélli de Paula. **Impacto das mudanças climáticas na vazão e na dinâmica de sedimentos em grandes bacias hidrográficas: estudo de caso da bacia do rio Doce**. 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

ESPÍRITO SANTO. **Agência Estadual de Recursos Hídricos – Agerh**. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo (PERH). Vitória, ES, 2012.

FAN, Fernando Mainardi *et al.* Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. *In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos*, 21, 2015, Brasília, Anais... Porto Alegre: ABRH, 2015.

FAO-AQUASTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**. AQUASTAT Database. Disponível em: <https://bit.ly/3pIAODG>. Acesso em: 14 fev. 2023.

FIELD, Christopher B. *et al.* Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. **Cambridge University Press**, 2012.

GUPTA, Hoshin Vijai; SOROOSHIAN, Soroosh; YAPO, Patrice Ogou. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal Of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HUNTINGTON, Thomas. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. **Journal of Hydrology**, v. 319, n. 1-4, p. 83-95, 2006.

IPCC, 2008: **Climate Change and Water**: Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Bates, Bryson C.; Kundzewicz, Zbigniew W., Wu, Shaohong; Palutikof, Jean P. (eds.)]. IPCC Secretariat, Geneva, 210 p., 2008.

IPCC, 2013: **Climate change 2013**: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 1535, 2013.

IPCC, 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 [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.

KNUTTI, Reto *et al.* Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, 3, 369-373, 2012.

KRYSANOVA, Valentina *et al.* How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 5, p. 696-720, 2018.

KRYSANOVA, Valentina *et al.* (2018). How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. **Hydrological Sciences Journal**, 63(5), 696-720.

LEHNER, Flavio *et al.* The potential to reduce uncertainty in regional runoff projections from climate models. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 12, p. 926-933, 2019.

LEVY, Morgan C. *et al.* Land use change increases streamflow across the arc of deforestation in Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 8, p. 3520-3530, 2018.

LIMA, José Wanderley Marangon; COLLISCHONN, Walter; MARENGO, Jose A. (Org.) **Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. 1ed. São Paulo: Hunter, 2014, v. 3, 282p.

LYRA, Andre *et al.* 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**, v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 2017.

MARENGO, José Antônio *et al.* 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**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2011.

MARENGO, José Antônio. Água E Mudanças Climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008.

MARENGO, José Antônio. Mudanças Climáticas Globais e Regionais: Avaliação do Clima atual do Brasil e Projeções de cenários climáticos do Futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 01–18, 2001.

MASSON-DELMOTTE, V., *et al.* IPCC, 2021: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

MILLY, Paul C. D.; DUNNE, Krista A. A hydrologic drying bias in water-resource impact analyses of anthropogenic climate change. **J. Am. Water Resour. Assoc.**, v. 53, p. 822-838, 2017.

MILLY, Paul C. D.; DUNNE, Krista A. Potential evapotranspiration and continental drying. **Nature Clim. Change**, v. 6, p. 946-949, 2016.

MOORS, Eddy J.; DOLMAN, Albertus J. Land-Use Change, Climate and Hydrology. *In*: DOLMAN Albertus J.; VERHAGEN, A.; ROVERS, C. A. (eds.). **Global Environmental Change and Land Use**. Dordrecht: Springer, 2003, p. 139-165.

NEW, Mark George *et al.* A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21, p. 1-25, 2002.

NOBRE, Carlos A.; REID, Julia; VEIGA, Ana Paula Soares. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 44 p. 2012.

NOBRE, Paulo *et al.* Climate Simulation and Change in the Brazilian Climate Model. **Journal Of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716-6732, 2013.

OKI, Taikan; KANAE, Shinjiro. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. **Science**, v. 313, n. 5790, p. 1068-1072, 2006.

OLIVEIRA, Paulo Tarso S. *et al.* Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resour. Res.**, v. 50, n. 9, p. 7100-7114, 2014.

PIRH-BACIA DO RIO DOCE. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce – PIRH Bacia do Rio Doce – Volume I**. Consorcio Ecoplan–Lume. 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3pTp2Xn>. Acesso em: 31 jan. 2023.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro *et al.* MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1-20, 2017.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.

SALAZAR, Luis F.; NOBRE, Carlos A.; OYAMA, Marcos D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 9, p. 1-6, 2007.

SCHEWE, Jacob *et al.* Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014.

SHUKLA, P.R., *et al.* IPCC, 2019: Summary for Policymakers. *In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.*

SIQUEIRA, Vinícius Alencar *et al.* IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016.

VAN VUUREN, Detlef P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

VÖRÖSMARTY, Charles *et al.* Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. **Science**, v. 289, n. 5477, p. 284-288, 2000.

WATANABE, Masahiro *et al.* Improved Climate Simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal Of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

XAVIER, Alexandre C.; KING, Carey W.; SCANLON, Bridget R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **Int. J. Climatol.**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

ZANINELLI, Pablo G., *et al.* **Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models.** *Clim. Dyn.* 52, 819–830. DOI: <https://bit.ly/3OoPm5W>, 2019.



# CAPÍTULO 4

## RESILIÊNCIA URBANA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS – ESTUDO DE CASO: INUNDAÇÕES NA BACIA DE BENTO FERREIRA EM VITÓRIA, ES

*Ingrid Tonon  
Kátia Cañellas*

### **Introdução**

As previsões climáticas para os próximos anos e décadas apontam uma perspectiva adversa para pessoas e comunidades desfavorecidas, independentemente do nível de desenvolvimento do país. Segundo os estudos mais atuais, as mudanças climáticas serão maiores do que aquelas até então previstas, causando impactos generalizados nos sistemas socioecológicos. Assim, os riscos serão ampliados, surgirão novos riscos e sua distribuição será desigual (IPCC, 2018).

Nesse contexto, as comunidades vulneráveis são as mais afetadas, especialmente por não possuírem estratégias de enfrentamento eficazes para lidar com os desafios projetados (Care Poverty Environment and Climate Change Network, 2011). Portanto, elas precisam buscar dentro de seus próprios recursos, ou em conexão com os apoios externos, meios para identificar e reconhecer suas vulnerabilidades, avaliar suas ações anteriores de adaptação e aprender com seus erros e acertos. Assim, essas comunidades podem gerar novas formas de agir. Em muitos casos, isso exigirá um pensamento sistêmico e uma ação inovadora, que podem desencadear mudanças no funcionamento do sistema como um todo e nas relações sociais e de poder.

Por isso, a resiliência se tornou uma meta importante nas discussões atuais, sendo uma característica que pode ser construída. Normalmente, a resiliência é tratada como contraponto da vulnerabilidade, pois enquanto a primeira consiste em um aspecto positivo, a segunda

é vista como um conceito negativo. Ela ajuda a entender como as comunidades podem responder à mudança climática enquanto mantêm e desenvolvem funções comunitárias essenciais, como, por exemplo, a garantia de suas necessidades básicas e de seu bem-estar.

## **1. O entendimento dos riscos climáticos**

Os riscos climáticos, de acordo com o IPCC (2014), são potenciais consequências adversas para os sistemas humanos ou ecológicos causados por extremos climáticos e mudanças climáticas. Um risco climático é resultado das interações entre os perigos relacionados ao clima com a exposição e a vulnerabilidade de sistemas naturais e humanos.

Um perigo climático caracteriza-se pela ocorrência de um evento físico ou uma tendência potencialmente prejudicial relacionada ao clima (por exemplo, uma inundação provocada por uma tempestade). Seu impacto físico pode causar danos às propriedades e infraestruturas, perdas humanas, impactos aos meios de subsistência, prestação de serviços, ecossistemas e recursos ambientais. Por sua vez, a exposição consiste na presença de elementos (pessoas, edificações, infraestrutura, atividades sociais, econômicas ou culturais, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, serviços e recursos) em lugares e ambientes que podem ser adversamente afetados, como, por exemplo, uma habitação localizada às margens de um rio. Já a vulnerabilidade descreve a propensão ou predisposição para ser adversamente afetado (por exemplo, uma construção em condições precárias e a falta de recursos econômicos e sociais para melhorá-la). Ela abrange uma variedade de conceitos e elementos, incluindo a sensibilidade ou a suscetibilidade a danos, a falta de capacidade de lidar com isso e a adaptabilidade. O nível em que um sistema é afetado, tanto negativa como beneficemente, pela variabilidade climática é denominado sensibilidade ou suscetibilidade. Por sua vez, a capacidade da entidade de gerenciar os impactos negativos e aproveitar as oportunidades que surgirem é designada capacidade adaptativa (IPCC 2014).

Muitos riscos climáticos não surgem especificamente de perigos climáticos, mas a partir de uma combinação de diferentes fatores, especialmente aqueles de origem socioeconômica. Processos de desenvolvimento desigual produzem desigualdades multidimensionais que, muitas vezes, determinam a vulnerabilidade e a exposição (IPCC, 2012).

Em geral, a mudança do clima intensifica e amplia problemas que já são conhecidos numa cidade, como a ocorrência de fortes chuvas com pontos de alagamento, inundações, deslizamentos, entre outros. É a partir do conhecimento das vulnerabilidades climáticas que os riscos podem ser avaliados, considerando como os sistemas frágeis ou grupos marginalizados estão expostos a impactos climáticos diretos ou indiretos. Em seguida, é possível iniciar o processo de desenvolvimento de estratégias de resiliência para responder às vulnerabilidades identificadas.

## **2. O conceito de resiliência**

A resiliência é a capacidade de um sistema em absorver perturbações e reorganizar-se enquanto está sujeito a forças de mudança, sendo capaz de manter o essencial de suas funções, estrutura, identidade e mecanismos de funcionamento (Walker *et al.*, 2004). Dessa forma, é a capacidade de uma comunidade ou sociedade de adaptar-se quando exposta a um perigo.

Embora o conceito de resiliência ainda seja amplamente discutido, não é um conceito novo. Ele surgiu no campo da Epidemiologia e, mais tarde, foi introduzido na Psicologia, na Física, na Engenharia, na gestão de risco etc. (Nelson, 2011). Na Física, foi utilizado para descrever a estabilidade dos materiais e sua resistência a choques externos. Por estar associada à noção de estabilidade, é chamada de resiliência de engenharia por muitos autores (Folke, 2006; Gunderson, 2000). Um exemplo é a característica de uma mola que, comprimida sob pressão, retorna ao seu estado normal assim que essa pressão desaparece (Davoudi; Porter, 2012).

Holling introduziu pela primeira vez o conceito de resiliência na Ecologia em 1973, descrevendo-a como:

[...] a persistência de relações num sistema; uma medida da capacidade dos sistemas em absorver alterações das suas variáveis de estado, das suas variáveis determinantes e dos seus parâmetros, continuando a perdurar no tempo. (Holling, 1973; 2001)

Por isso, é definida como a capacidade de um sistema retornar ao equilíbrio ou a um estado estável após uma perturbação. Atualmente, o conceito de resiliência tem uma variedade de definições conforme as diferentes disciplinas (Nelson, 2011; Meerow *et al.*, 2016). Porém, existe uma diferença entre a abordagem da resiliência como noção de equilíbrio para os conceitos da Engenharia, da Ecologia e da Socioecologia. Os estados de equilíbrio podem variar para apenas o retorno ao estado normal (Engenharia); a múltiplos estados de equilíbrio (Ecológico), tendo em vista que, face a um distúrbio, o sistema pode absorvê-lo, transformá-lo e atingir um novo estado de equilíbrio; e o chamado não equilíbrio dinâmico (Socioecológico), que visualiza alternadamente a resiliência como um processo de evolução e/ou transformação, reconhecendo as constantes mudanças de um sistema e ajustando-se conforme as condições de mudança (Meerow *et al.*, 2016; Unhabitat, 2017).

Sendo assim, a resiliência pode ser entendida de três formas: como estabilidade/resistência, como recuperação e como transformação. A resiliência como resistência consiste na capacidade de um sistema permanecer íntegro e suportar uma situação difícil, que abala a normalidade, e pode gerar danos materiais e estresse. A resiliência como recuperação refere-se à capacidade de voltar ao estado original após a alteração, devido a alguma situação adversa. Já a resiliência como transformação implica uma situação mais complexa, na qual as pessoas são capazes de resistir a uma situação, proteger sua integridade e, apesar das ameaças, sair fortalecidas e transformar a experiência em algo positivo (Meerow *et al.*, 2016).

Entre todas as definições, há um consenso sobre dois pontos importantes: primeiro que, a resiliência é mais bem conceituada como uma capacidade ou processo, do que como um resultado; e segundo que, a resiliência deve ser entendida como capacidade adaptativa e não como estabilidade (Norris *et al.*, 2008).

### **3. A resiliência urbana**

A resiliência é um conceito que vem sendo cada vez mais explorado nos estudos sobre os territórios, em especial o espaço urbano, como uma oportunidade para enriquecer ou renovar a gestão e as políticas públicas (Farias, 2017).

A resiliência urbana é entendida como a capacidade de uma cidade absorver perturbações mantendo seu funcionamento normal, sem entrar em colapso (IPCC, 2014). Uma cidade é resiliente quando possui a propriedade de garantir o seu funcionamento para que as pessoas que vivem e trabalham em seu território, principalmente os mais vulneráveis, sobrevivam e prosperem independentemente da ocorrência de eventos extremos (Strengari *et al.*, 2015).

A cidade é um sistema vivo, dinâmico, gerador de (e gerado por) conectividades e aberto a constantes interações, quer no seu interior, quer por via da exposição a fatores externos. Como um sistema complexo e multiescalar, não é apenas um sistema ecológico, mas também social, que está em constante processo de mudança e adaptação. Por isso, o processo adaptativo não requer necessariamente que o sistema retorne a um estado de equilíbrio após ter sido atingido.

O meio urbano engloba redes de governança, fluxos de materiais e energia, dinâmicas socioeconômicas e infraestrutura do ambiente construído (Meerow *et al.*, 2016). Os fluxos metabólicos se relacionam à produção, aos suprimentos e às cadeias de consumo, e sustentam as funções urbanas, do bem-estar humano e da qualidade de vida. As redes governamentais compreendem as estruturas institucionais e as organizações que definem a capacidade da sociedade de aprender, se adaptar e se reorganizar para enfrentar os desafios ur-

banos. As dinâmicas sociais envolvem a demografia, o capital humano e a equidade. Elas definem as pessoas como cidadãos, membros de comunidades, usuários de serviços e consumidores de produtos. E, por fim, o ambiente construído é caracterizado por sistemas na paisagem urbana. Ele define os padrões físicos da forma urbana e suas relações e interconexões espaciais (Resilience Alliance, 2007).

A evolução da resiliência em meio urbano pode ser vista, como um contínuo, desde a persistência até a transformação. O sistema mantém o foco na capacidade de reter as principais funções desejáveis e o percurso para a resiliência passa por diferentes graus de mudança. Por isso, ele é considerado um sistema, não um equilíbrio (Tyler; Moench, 2012).

A resiliência urbana às mudanças climáticas abrange a adaptação às mudanças climáticas, ações de mitigação e redução do risco de desastres. Porém, a resiliência climática se diferencia da adaptação à mudança climática, pois a adaptação é focada principalmente em absorver e/ou evitar danos de pressões climáticas pendentes ou previstas. Já a resiliência é definida de forma mais ampla, de modo que envolve os vários sistemas que afetam a capacidade de uma cidade de se antecipar, absorver e se reorganizar em relação a ameaças conhecidas e desconhecidas (Meerow *et al.*, 2016).

Uma das características mais úteis em adotar o conceito de resiliência como uma estrutura de análise da vulnerabilidade às mudanças climáticas em sistemas urbanos é a sua capacidade de enquadrar as questões dentro de uma abordagem sistêmica. O pensamento sistêmico fornece uma plataforma para uma abordagem mais holística, em que as áreas urbanas são consideradas como sistemas “vivos” complexos, que passam por inúmeras trocas dinâmicas a qualquer momento.

Isso é relevante, pois os choques afetam simultaneamente famílias e comunidades inteiras. Da mesma forma, o grande número de processos e dinâmicas que afetam pessoas e ambientes estão ocorrendo em diferentes escalas, local e global, e frequentemente são caracterizados por *feedbacks* (Béné *et al.*, 2012).

A literatura aponta uma série de características da resiliência urbana. Entre elas, destacam-se sete qualidades fundamentais de um sistema urbano resiliente (Arup & The Rockefeller Foundation, 2016):

- Inclusão: baseado em uma ampla consulta e no engajamento de *stakeholders*;
- Integração: constrói links entre diferentes sistemas, instituições e disciplinas para ampliar benefícios;
- Flexibilidade: capaz de adotar opções alternativas em resposta a diferentes circunstâncias;
- Reflexividade: aprende com experiências do passado para definir futuras decisões;
- Engenhosidade: considera caminhos alternativos no uso de recursos para alcançar os objetivos;
- Robustez: é bem desenhado e durável, construído e gerido para reduzir riscos a falhas;
- Redundância: construído com capacidade extra para acomodar interrupções.

Construir resiliência às mudanças climáticas é uma tarefa complexa, particularmente em cidades em rápida expansão. Os caminhos para a construção da resiliência ao clima incluem dois atributos abrangentes (Denton, 2014):

- Ações para reduzir as mudanças climáticas induzidas pelo homem e seus impactos, incluindo mitigação e adaptação para alcançar o desenvolvimento sustentável;
- Ações para garantir que instituições, estratégias e escolhas eficazes para a gestão de riscos sejam identificadas, implementadas e sustentadas como parte integrante do alcance do desenvolvimento sustentável.

Assim, a busca de caminhos resilientes ao clima envolve a identificação de vulnerabilidades aos impactos das mudanças climáticas; avaliação de oportunidades para redução de riscos; e a realização de ações que sejam consistentes com os objetivos de desenvolvimento sustentável (UN, 2016).

#### **4. Redução de riscos de desastres para a construção da resiliência**

Os relatórios mais recentes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas tem destacado o potencial crescimento de desastres associados à mudança climática global (IPCC, 2014). Nos últimos anos, o incremento da resiliência da sociedade frente aos impactos climáticos e a gestão de riscos de desastres têm sido abordados como elementos indispensáveis ao desenvolvimento econômico e social das cidades (The World Bank, 2013).

O conceito de gestão de risco de desastre compreende um processo sistemático de usar decisões administrativas, organização, habilidades operacionais e capacidades para implementar políticas, estratégias e capacidades de enfrentamento da sociedade e das comunidades para diminuir os impactos de desastres naturais e ambientais (UNISDR, 2009). A gestão do risco de desastres aplica políticas e estratégias de redução dos riscos de desastres (RRD) para prevenir novos, reduzir os existentes e gerenciar os residuais, contribuindo para o fortalecimento da resiliência e redução das perdas por desastres (IPCC, 2012). A RRD considera os desastres como um fenômeno de origem socioeconômica e política, vinculado ao contexto social, político, ambiental e econômico mais amplo de uma ameaça (Mercer, 2010).

Os fatores de risco de desastres no meio urbano são resultado da urbanização não planejada, da pobreza persistente e da degradação do ecossistema, que são exacerbados pela mudança climática. O gerenciamento do risco de desastres nas cidades, combinado com a adaptação às mudanças climáticas, pode ser enfrentado por meio dos cinco fatores-chave: 1) desenho e planejamento urbano; 2) governança; 3) economia urbana; 4) participação e inclusão; e 5) tecnologia da informação e comunicação (Klug, 2018). O risco de desastres pode ser reduzido por meio de esforços sistemáticos para analisar e gerenciar os fatores causais dos desastres, reduzindo a exposição a perigos, diminuindo a vulnerabilidade de pessoas e propriedades, fazendo uma gestão inteligente do território e do meio ambiente e melhorando a preparação para eventos adversos (The World Bank, 2013).

São cinco os pilares de ação de gestão de risco que abordam o problema de uma perspectiva orientada para a ação. A identificação de riscos fornece a base para todas as outras ações: reduzir o risco (colocando políticas e planos em vigor que ajudarão a evitar a criação de novos riscos ou abordando os já existentes); para se preparar para o risco residual, seja fisicamente (preparação) ou financeiramente (proteção financeira); e para informar o projeto de reconstrução resiliente (World Bank, 2013).

## **5. Os programas para cidades resilientes**

A resiliência é uma das agendas de desenvolvimento urbano que tem a capacidade de engajar uma variedade de agentes globais, regionais e locais interessados. O relatório *Trends in Urban Resilience 2017*, do Unhabitat, mapeou uma rede global de atores e retratou graficamente os principais *stakeholders* envolvidos nas atividades relacionadas à resiliência urbana. Fazem parte dessa rede, órgãos das nações governamentais ou intergovernamentais, organizações não governamentais, atores privados, fundações filantrópicas, universidades, institutos de investigação, entre outros (Un-Habitat, 2017). Dentre as principais instituições e sistemas que lidam com a resiliência urbana estão os Sistemas das Nações Unidas (Un-Habitat, UNISDR e UNDP), a Fundação Rockefeller e a União Europeia. Essas instituições são responsáveis pelos principais programas de desenvolvimento de cidades resilientes. São eles:

### ***Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas***

Foi estabelecido pelas Nações Unidas em 1966, com a fusão do Programa Expandido de Assistência Técnica das Nações Unidas e do Fundo Especial das Nações Unidas. Esse programa está ativo atualmente em cerca de 170 países e visa erradicar a pobreza e reduzir a desigualdade e a exclusão. O programa atua em quatro linhas de trabalho: 1) redução do risco de desastres, 2) mudança climática, 3)

recuperação e 4) comunidade e coesão social. Assim, a resiliência é entendida como um processo transformador de fortalecimento da capacidade de homens, mulheres, comunidades, instituições e países de se antecipar, prevenir, se recuperar e transformar em caso de choques, tensões e mudanças.

### ***Programa Construindo Cidades Resilientes***

Foi lançado em 2010 como parte da Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNISDR, do inglês) e, desde então, tem mobilizado agentes locais em diferentes cidades do globo na busca de atingir seus objetivos. Como parte da campanha, a UNISDR foi pioneira na Ferramenta de Autoavaliação do Governo Local (LGSAT), um sistema que fornece medições importantes em relação aos Dez Princípios para “Construir Cidades Resilientes”. Tais princípios foram desenvolvidos de acordo com a Estrutura Hyogo para Ação 2005 - 2015 (HFA). Os dez fundamentos são:

1. Organizar-se para resiliência a desastres;
2. Identificar, compreender e usar os cenários de risco presentes e futuros;
3. Fortalecer a capacidade financeira para resiliência;
4. Buscar um desenvolvimento urbano e designs resilientes;
5. Proteger os amortecedores naturais para melhorar as funções de proteção oferecidas pelos ecossistemas naturais;
6. Fortalecer a capacidade institucional de resiliência;
7. Compreender e fortalecer a capacidade da sociedade para resiliência;
8. Aumentar a resiliência da infraestrutura;
9. Garantir uma resposta eficaz a desastres;
10. Acelerar a recuperação e reconstruir melhor.

A UNISDR entende a resiliência como a capacidade de um sistema, comunidade ou sociedade de resistir, absorver, acomodar e se recuperar dos efeitos de uma ameaça de maneira oportuna e eficiente, inclusive por meio da preservação e restauração de suas estruturas e funções básicas essenciais.

Para a organização, um governo local comprometido e inclusivo é capaz de construir uma cidade resiliente a desastres naturais. A minimização dos efeitos de um desastre pode ocorrer a partir do estímulo à construção de moradias em áreas seguras; informando e capacitando a população acerca das ameaças naturais; valorizando o conhecimento local; antecipando e mitigando desastres em infraestruturas, residências e patrimônios cultural e ambiental por meio de monitoramento, alerta e alarme; e definindo estratégias de reconstrução e reestabelecimento dos serviços básicos após o desastre (UNISDR, 2012).

### ***Programa 100 Cidades Resilientes (100RC)***

Foi criado pela Fundação Rockefeller, em 2013, e apoiado por uma ampla rede de parceiros globais. Seu objetivo foi auxiliar as cidades no aumento da resiliência urbana nos níveis espacial, econômico e social. Esse projeto selecionou cem cidades ao redor do mundo e vem trabalhando de uma forma conjunta na elaboração de estratégias locais de resiliência.

Por meio de uma parceria estratégica, a Arup forneceu à 100RC o City Resilience Index – uma ferramenta desenvolvida com o apoio financeiro da Fundação Rockefeller – que auxilia os diretores locais de resiliência em atividades de consultoria (Arup, 2014). O índice fornece às administrações locais um instrumento acessível e baseado em evidências para avaliar seus padrões de resiliência, bem como para desenvolver planejamento urbano integrado, prática e diretrizes de investimento.

O programa entende a resiliência como a capacidade de indivíduos, comunidades, instituições, empresas e sistemas dentro de

uma cidade de sobreviver, se adaptar e crescer, não importando os tipos de estresse crônico e choques agudos que experimentem.

### ***Projeto RESCCUE***

A sigla é proveniente do inglês, e representa “Resiliência para enfrentar as mudanças climáticas em áreas urbanas: uma abordagem multissetorial com foco na água”. Lançado em 2016, o projeto – que reúne um consórcio de dezessete parceiros – beneficia-se de financiamento da União Europeia, disponibilizado através do seu enquadramento Horizonte 2020.

Seu objetivo é ajudar cidades ao redor do mundo a enfrentarem choques ou estresses físicos, sociais e econômicos, tomando o setor da água como sua porta de entrada para os sistemas urbanos. No coração do projeto RESCCUE está a ferramenta HAZUR®: um instrumento de diagnóstico desenvolvido pela empresa Opticits que avalia os serviços urbanos e o status da infraestrutura crítica sob estresse crônico e extraordinário. A ferramenta está em teste experimental, sendo aplicada em projetos pilotos em 3 cidades da Europa: Lisboa, Bristol e Barcelona. O consórcio RESCCUE prevê uma abordagem multissetorial e holística para a resiliência urbana que, usando a água como ponto de entrada, investiga as interconexões entre as mudanças climáticas e os desafios urbanos locais, bem como os potenciais efeitos em cascata ligados a qualquer perigo.

Para além dessas organizações, um conjunto de plataformas multilateralistas fomentam a cooperação das partes bem como a disseminação dos aprendizados adquiridos.

## **6. As estratégias de avaliação da resiliência urbana**

A medição da resiliência é uma nova área de pesquisa e de prática em rápido desenvolvimento (Bahadur; Wilkinson; Tanner, 2015). Um número crescente de instituições e organizações têm desenvolvido ferramentas e estruturas de avaliação para medir a resiliência de comunidades urbanas (Sharifi; Yamagata, 2016). Algumas

avaliações de resiliência se concentram na infraestrutura física, enquanto outras procuram usar métodos padronizados que permitem comparações entre diferentes cidades. Porém, considerando que a resiliência é um fenômeno multidimensional, o projeto e a implementação de estratégias para a avaliação da resiliência urbana devem integrar as dimensões econômica, social, ambiental e institucional (Figueiredo; Honiden; Schumann, 2018).

Em geral, a adoção de indicadores é usada como forma de transformar a resiliência em um conceito mensurável e fornecer uma lente através da qual as complexidades das cidades como sistemas socioecológicos podem ser melhor compreendidas (Sharifi; Yamagata, 2016). Os indicadores são uma ferramenta de avaliação, informação e monitoramento. Como ferramenta de avaliação, ajudam a identificar riscos e vulnerabilidades. Como uma ferramenta de informação, eles podem instruir melhor a concepção de sistemas de alerta precoce, planos de resposta a emergências, planos de uso do solo e códigos de construção, bem como aumentar a conscientização e comunicar sobre vulnerabilidades e riscos. Já como uma ferramenta de monitoramento, eles podem identificar o quão bem uma cidade respondeu e se recuperou de desastres e choques, e se as metas foram alcançadas. Assim, os indicadores estão presentes durante todo o processo de construção da resiliência (Figueiredo; Honiden; Schumann, 2018).

Entretanto, a seleção de indicadores depende de três fatores: 1) os objetivos da intervenção; 2) o entendimento do conceito de resiliência; e 3) a linha de base (Schipper; Langston, 2015; Brown; Shaker; Das, 2016). Em geral, existe alguma variação nas definições de resiliência que são usadas, mas a maioria das estruturas adere àquelas usadas em sistemas socioecológicos, como a capacidade do sistema de funcionar em meio a perturbações (Folke, 2006).

A avaliação da resiliência pode ter um caráter quantitativo ou qualitativo. Os indicadores quantitativos são representações numéricas de fenômenos complexos, por exemplo, aumento/diminuição percentual, razões ou números absolutos. Eles podem ser úteis em todos os estágios temporais de um projeto de resiliência, podendo até ajudar na avaliação da força das características de resiliência, embora isso geralmente seja mais bem realizado com o uso de indicadores

qualitativos. Já os indicadores qualitativos relatam a qualidade de uma determinada entidade, muitas vezes usando dados subjetivos, ou seja, contando com sujeitos (pessoas), em vez de objetos (instrumentos).

Dentre os vários estudos e iniciativas no âmbito da avaliação da resiliência às mudanças climáticas, foram desenvolvidos diferentes procedimentos, normas internacionais e ferramentas para a sua quantificação em escala urbana.

Para exemplificar um desses procedimentos, apresentamos a seguir um estudo de caso desenvolvido por Tonon (2020) que traz uma avaliação da resiliência urbana às mudanças climáticas na cidade de Vitória (ES).

## 7. Estudo de caso

A motivação inicial para esse projeto foi a pesquisa e controle dos efeitos de inundações em meio urbano, com aplicação à cidade de Vitória, que evolui negativamente com o passar do tempo, principalmente devido ao aumento da dinâmica de ocupação do solo, mas também ao risco de agravamento de eventos extremos.-

A problemática central do trabalho foram as inundações urbanas, as principais áreas afetadas e suas consequências. A pergunta central foi: o que pode ser feito em relação à avaliação dos efeitos das inundações urbanas e orientações para intervenções de aumento da resiliência sem custos desproporcionados? O objetivo desse estudo de caso foi desenvolver um procedimento simplificado de avaliação da resiliência às inundações urbanas, e aplicar na cidade de Vitória nos cenários atuais e de alterações climáticas.

As inundações no Brasil são associadas ao termo em inglês *flood*, e são consideradas como a

[...] submersão de áreas fora do limite de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de forma gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície [...]. (Cobrade, 2020)

Para as “inundações urbanas”, ou *urban flooding*, é utilizado no Brasil o termo “alagamento”, definido como:

Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e conseqüentemente acúmulo da água nas ruas, calçadas e outras infraestruturas urbanas em decorrência de precipitações extremas. (Cobrade, 2020)

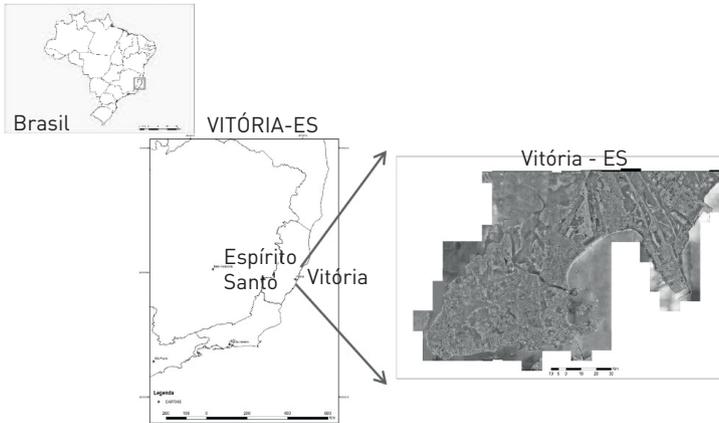
No contexto do trabalho, foram utilizados os termos “inundações” e “inundações urbanas” no sentido do termo “alagamento” no Brasil, já que esse estudo foi uma adaptação de uma tese de doutorado apresentada em Portugal e os termos utilizados condizem com os usados localmente.

### ***7.1 Caracterização da área de estudo***

O Município de Vitória localiza-se na costa Sudeste do Brasil (lat. -20.3222; long. -40.3381), possui uma área de 98,51 km<sup>2</sup> e uma altitude média de 4 metros (Figura 1). De acordo com a classificação climática de *Köppen-Geiser*, o clima é tropical com estação seca. Segundo o Incaper (2018), a média anual das temperaturas máxima e mínima varia entre 18 e 32 °C, segundo os dados dos anos de 1976 a 2014. Quanto à pluviometria, os meses chuvosos concentram-se entre outubro e março, e os de estiagem entre maio e setembro (Coelho, 2017). Os principais sistemas atmosféricos que influenciam as condições climáticas no município estão ligados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), às Frente Frias (FF) e ao Anticiclone ou Alta Subtropical do Atlântico Sul (Asas) (Coelho, 2017).

A cidade de Vitória, capital do estado do Espírito Santo, é formada por um conjunto de ilhas que foram agregadas por meio de aterro e que agora totalizam uma área de 93,381 km<sup>2</sup>, onde vivem

cerca de 350 mil habitantes<sup>1</sup>, segundo as últimas estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. O Município é dividido em dois Distritos (Vitória e Goiabeiras), que são subdivididos em nove Regiões e oitenta bairros (IBGE, 2018).



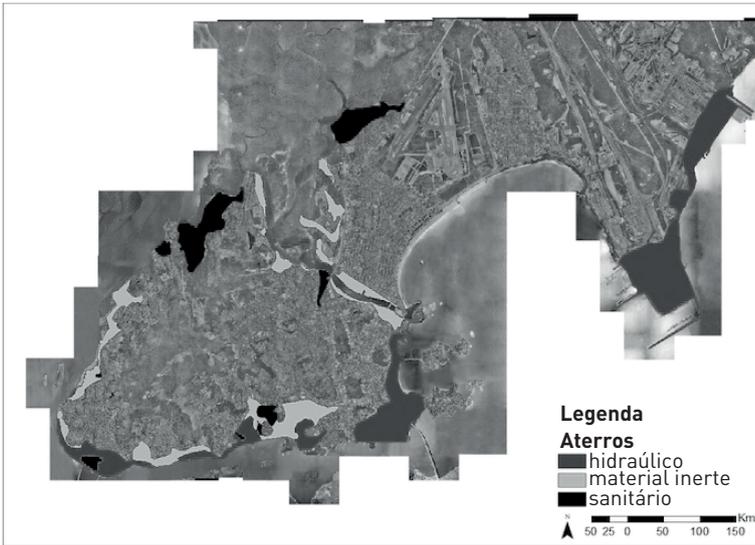
**Figura 1. Localização da área de estudo**  
Fonte: Elaboração própria.

O processo de urbanização da cidade de Vitória, a princípio, evoluiu com obras de expansão sobre aterros, no qual foi expandida uma área de 15,7 km<sup>2</sup> com o objetivo de ampliar avenidas, instalar praças e portos (Figura 2). Com essas obras, a cidade adquiriu novos contornos, foram eliminadas algumas praias e enseadas, e foi feita a ligação de ilhas e de afloramentos rochosos. Boa parte dos aterros resultaram em áreas ao nível do mar, contribuindo com o processo de inundação costeira quando as chuvas são associadas à maré alta (Coelho, 2017).

A ocupação da região continental da cidade tornou-se relevante a partir da década de 1960. Também, nessa época, nota-se a intensificação da ocupação das encostas do Maciço Central (afloramento granítico localizado no centro da ilha). Um fato im-

1. População estimada para 2014, através dos dados do censo de 2010.

portante que contribuiu para o aumento da taxa de crescimento populacional foi a instalação de grandes empreendimentos, como a Companhia Siderúrgica de Tubarão (1976) e a Companhia Vale do Rio Doce (<https://bit.ly/3Uo3vjf>).



**Figura 2. Aterros na cidade de Vitória – ES**

Fonte: Elaboração própria.

No período entre 1980 e 1990, ocorreu a ocupação da porção Noroeste da ilha com o nascimento de novos bairros. Foram ocupações caracterizadas como “invasões” da população de baixa renda em áreas de risco sem infraestrutura (<https://bit.ly/3Uo3vjf>).

Segundo Nicolodi e Petermann (2010), a região que abrange os municípios de Vitória, Vila Velha e Guarapari é classificada como vulnerável, citando principalmente o nível de ocupação elevado na costa desses municípios, que têm uma densidade demográfica superior à média de ocupação do restante do litoral capixaba. Quanto à suscetibilidade física, observam-se as grandes áreas ao nível do mar

com presença de plataformas de abrasão<sup>2</sup> da Formação Barreiras<sup>3</sup> e pequeno aporte fluvial (Albino *et al.*, 2006).

A conformação geomorfológica da ilha de Vitória segue o padrão das regiões costeiras brasileiras, em que se nota a presença de áreas planas circundadas por elevações que se destacam, como o caso do maciço central em Vitória. Essa conformação geomorfológica restringe a ocupação humana, que se divide em áreas de fundo de vale, encostas e aterros. Associado a esses aspectos, deve considerar-se o aumento da população urbana a partir da década de 60 e a influência das marés no regime de escoamento pluvial. A combinação desses fatores reflete diretamente na ocorrência de inundações, que se tornam mais frequentes, sujeitando a população a vários transtornos e comprometendo o desempenho da cidade (Prefeitura Municipal de Vitória, 2008).

O Complexo Portuário de Tubarão, que iniciou suas atividades na década de 60, alterou o padrão de ondas e gerou inúmeras modificações na costa, acarretando desequilíbrios sedimentares e processos erosivos. Outras transformações se seguiram a fim de viabilizar o crescimento urbano e solucionar o processo erosivo, como a construção de espigões e recarga de areia na praia de Camburi (Albino *et al.*, 2006).

Entre as vulnerabilidades observadas nas áreas costeiras devido a atuação do mar, destacam-se a sobrelevação do nível do mar, as ondas geradas por ventos extremos no caso de tempestades marítimas, a elevação do nível do mar e a erosão costeira. Com o uso dos dados das projeções do IPCC para o aumento do nível do mar e as cotas altimétricas da área de estudo, foi realizado um mapeamento, espacializando as áreas de baixa, média e elevada suscetibilidade à

- 
2. Plataforma litorânea aplanada e irregular, formada pelo desmoronamento de arribas e sendo constituída por blocos e sedimentos de grandes dimensões. Formase pela ação do ataque direto das ondas na base das arribas, nessa ação também intervêm areias e seixos transportados pela água do mar e gerando efeito abrasivo. A plataforma de abrasão na fase ativa caracteriza-se pela ligeira inclinação para o mar.
  3. Estrutura geomorfológica que abrange grande parte do litoral brasileiro. Possui origem sedimentar fluvial e marinha, caracterizado pela presença de arribas ativas, arribas não ativas e terraços (ou plataformas) de abrasão.

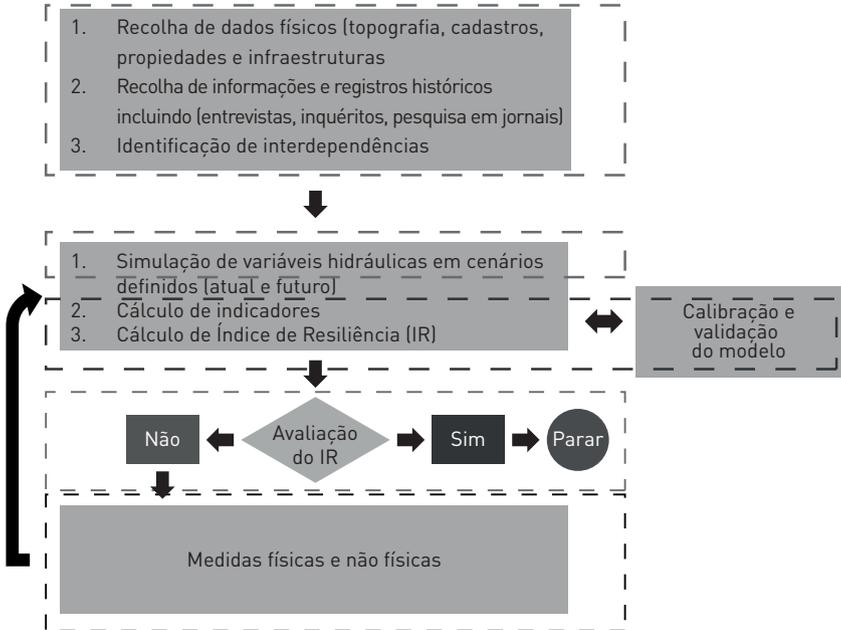
subida do nível do mar. Apesar do cenário em grande escala de tempo (2500), o mapeamento ilustra que boa parte da cidade poderá sofrer com o aumento do nível do mar. As regiões assinaladas como cenário de elevada suscetibilidade englobam áreas que, atualmente, já apresentam problemas com inundações.

Os estudos de Santos *et al.* (2019) indicam que as alterações por precipitação são mais significativas que as causadas pelo aumento de temperatura na microrregião do Espírito Santo, área que engloba a área metropolitana (consequentemente a capital, Vitória). É previsto para essa área o aumento de precipitações intensas, que são responsáveis por inundações, enxurradas e deslizamentos.

## **7.2 Metodologia**

No âmbito desse trabalho, foram escolhidos os principais serviços urbanos, e os efeitos das inundações foram estudados levando em consideração a geração de interdependências e os efeitos cascata. Nesse contexto, apresenta-se o desenvolvimento de uma ferramenta quantitativa baseada em indicadores para a avaliação da resiliência em meio urbano relativa às inundações, sendo proposto um procedimento simplificado e replicável que aponte quais intervenções urbanas devem ser tomadas e em qual área se deve atuar para que haja aumento da resiliência tanto em cenário atual, quanto sob efeito de alterações climáticas.

A metodologia pode ser ilustrada de acordo com a Figura 3, baseando-se fundamentalmente na identificação dos serviços afetados, na modelação 1D do desempenho hidráulico do sistema de drenagem para identificação de zonas inundadas e no cálculo de indicadores e índice de resiliência.



**Figura 3. Fluxograma simplificado da metodologia**

Fonte: Elaboração própria.

A metodologia dividiu-se em três momentos: a recolha de dados, as simulações e os cálculos, e as recomendações de medidas físicas e não-físicas de reestruturação. A primeira etapa foi o levantamento de dados de bens e serviços e sua espacialização. Os dados a serem utilizados devem se adequar às características da área de estudo com os seus aspectos físicos, econômicos e culturais (exemplo: transporte, residências, energia, abastecimento de água etc.). Para o levantamento dessas informações foram utilizados banco de dados públicos, dados fornecidos pela própria prefeitura da cidade, dados geográficos obtidos em sites especializados, dados levantados em campo, entrevistas e inquéritos, entre outros.

Também, foram levantados os componentes e serviços urbanos localizados na área de estudo. Foram escolhidos os principais serviços urbanos: as vias, as paradas de ônibus, os hospitais e postos de saúde, as áreas comerciais e as habitações. Na Figura 4, observa-se os servi-

ços urbanos levantados (eq.BF) e as paradas de ônibus (Bus). Essas foram inseridas em uma matriz para identificar as interdependências entre serviços e os possíveis efeitos cascata.



**Figura 4. Equipamentos urbanos e paradas de ônibus levantados na área de estudo**

Fonte: Elaboração própria.

A partir da fase de levantamento de dados, iniciou-se a fase de simulações. Nesse caso, foi utilizado o software SWMM 5.1<sup>4</sup>, que é *freeware*. Após a construção da rede foram definidas as precipitações e, para isso, foi utilizado o hietograma apresentado no PDDU (Plano Diretor de Drenagem Urbana) da cidade.

Para o cálculo do nível de maré foram consultadas as tabelas de maré publicadas pela Marinha Brasileira (DHN, 2017). As simulações realizadas foram feitas para o período de retorno<sup>4</sup> de 1, 10 e 50 anos,

---

4. O período de retorno, ou tempo de recorrência, representa o número médio de anos durante o qual se espera que um determinado evento extremo seja igualado ou superado; por exemplo, ao se dizer que o tempo de recorrência de uma precipitação é de 10 anos, tem-se que, em média, deve-se esperar 10 anos para que tal precipitação seja igualada ou superada.

para os mesmos períodos com o acréscimo das Alterações Climáticas (incremento de 10% nas precipitações e aumento do nível do mar de 0,4 m – cenário otimista IPCC – RCP 2.6), além da repetição das simulações anteriores, incluindo as obras de estruturação física do sistema de drenagem propostas pelo PDDU de Vitória (melhoramento de trechos do sistema de drenagem, melhoramento da capacidade das bombas elevatórias e implantação de 4 reservatórios enterrados).

Para os cenários apresentados foi utilizada a seguinte nomenclatura:

1 SA - Cenário atual com 1 ano de período de retorno;

10 SA - Cenário atual com 10 anos de período de retorno;

50 SA - Cenário atual com 50 anos de período de retorno;

1 AC - Cenário de alterações climáticas com 1 ano de período de retorno;

10 AC - Cenário de alterações climáticas com 10 anos de período de retorno;

50 AC - Cenário de alterações climáticas com 50 anos de período de retorno;

2A 1SA - Cenário atual, com acréscimo das propostas de melhoria do sistema de drenagem e com 1 ano de período de retorno;

2A 10 SA - Cenário atual, com acréscimo das propostas de melhoria do sistema de drenagem e com 10 anos de período de retorno;

2A 50 SA - Cenário atual, com acréscimo das propostas de melhoria do sistema de drenagem e com 50 anos de período de retorno;

2A 1AC - Cenário de alterações climáticas, com acréscimo das propostas de melhoria do sistema de drenagem e com 1 ano de período de retorno;

2A 10 AC - Cenário de alterações climáticas, com acréscimo das propostas de melhoria do sistema de drenagem e com 10 anos de período de retorno;

2A 50 AC - Cenário de alterações climáticas, com acréscimo das propostas de melhoria do sistema de drenagem e com 50 anos de período de retorno.

Após essa etapa, analisou-se as áreas de extravasamento com base nos cálculos do modelo, atendendo a topografia, e com o cálculo da altura de escoamento à superfície e espalhamento da água, considerando

as áreas de arruamentos, de passeio e as áreas edificadas. No caso desse estudo de caso, para essa etapa foi utilizado um algoritmo do Matlab<sup>®</sup> seguido do desenho da área afetada no Civil 3D<sup>®</sup>, gerando os dados para a confecção de mapas no Arcgis<sup>®</sup> e Qgis<sup>®</sup>.

Com os dados dos principais componentes e serviços urbanos da área de estudo, suas interdependências e efeitos cascata, foi feito um cruzamento de dados com o uso de programas de Sistema de Informação Geográfica, verificando os serviços urbanos essenciais localizados nas áreas inundáveis. Foram escolhidos sete indicadores de desempenho para a construção do índice de resiliência urbana frente às inundações. Esses indicadores foram divididos em três grupos de acordo com o grau de perturbação que uma inundação pode causar em determinado serviço urbano. Nesse caso, os grupos foram divididos em Grupo A: ID1, ID2 e ID3; Grupo B: ID4, ID5 e ID6 e Grupo C: ID7. Para tais, foram atribuídos pesos, conforme o Quadro 1.

De acordo com a análise da área de estudo foram propostos esses três pesos, em que os serviços do grupo A causavam maiores perturbações ao sistema urbano e mais efeitos cascata, por atuarem em serviços de ligação (vias e ruas). Para o grupo B foi proposto um valor intermediário, levando em consideração a importância dos serviços e novamente a ligação de efeito cascata para outros serviços urbanos. Deve-se ressaltar que a aplicação de pesos passou por testes piloto para ajustes de valores até tornar-se o mais próximo possível da realidade da área de estudo.

Grupo	Indicador de desempenho	Peso (wi)
Grupo A	Duração da inundação (ID1)	2,0
	Duração da inundação crítica (ID2)	
	Perturbação do tráfego (ID3)	
Grupo B	Afetação dos resíduos sólidos (ID4)	1,5
	Afetação dos serviços de saúde (ID5)	
	Afetação de habitações (ID6)	
Grupo C	Afetação dos serviços terciários (ID7)	0,5

**Quadro 1. Definição dos grupos de indicadores e pesos aplicados aos indicadores de desempenho**

Fonte: Elaboração própria.

Após a quantificação dos indicadores, foi calculado o índice de resiliência urbana específico face às inundações (IRUI<sub>e</sub>) para cada cenário e período de retorno proposto. Para a avaliação do índice global de resiliência face às inundações (ARUI<sub>g</sub>), devem combinar-se, num único índice, os valores de índice obtidos para as precipitações de diversos períodos de retorno.

Após aplicação do ARUI<sub>g</sub>, o resultado deve ser integrado ao quadro de classificação da avaliação de resiliência urbana face às inundações (Quadro 2), no qual o nível de resiliência urbana face às inundações nas áreas de estudo poderá ser categorizado como ótimo, bom, aceitável, insuficiente e péssimo, segundo a classificação percentual obtida através dos cálculos do IRUI<sub>e</sub> e ARUI<sub>g</sub>.

90 - 100%	Ótimo
75 - 90%	Bom
50 - 75%	Aceitável
30 - 50%	Insuficiente
0 - 30%	Péssimo

**Quadro 2. Classificação da avaliação de resiliência urbana face a inundações**

Fonte: Elaboração própria.

A calibração do modelo foi feita indiretamente, através de visitas a campo na ocasião de inundações, de informações sobre os registros de cheias, entrevistas a moradores das áreas atingidas, assim como através de fotos e vídeos divulgados na mídia local e dos relatos orais dos residentes.

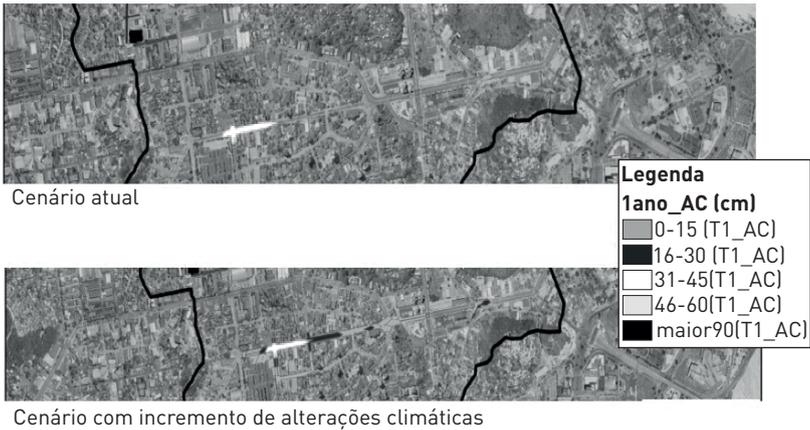
## 7.3 Resultados

### 7.3.1 Simulações e mapeamentos

Esse estudo de caso concentra-se na bacia de Bento Ferreira, que abrange a região administrativa de Jucutuquara e parte da região administrativa da Praia do Canto. A bacia engloba o bairro homônimo, além dos bairros de Ilha de Monte Belo, Jesus de Na-

zareth, Praia do Suá, Santa Lucia, Horto, Gurigica, Consolação, Bairro de Lourdes e Nazareth.

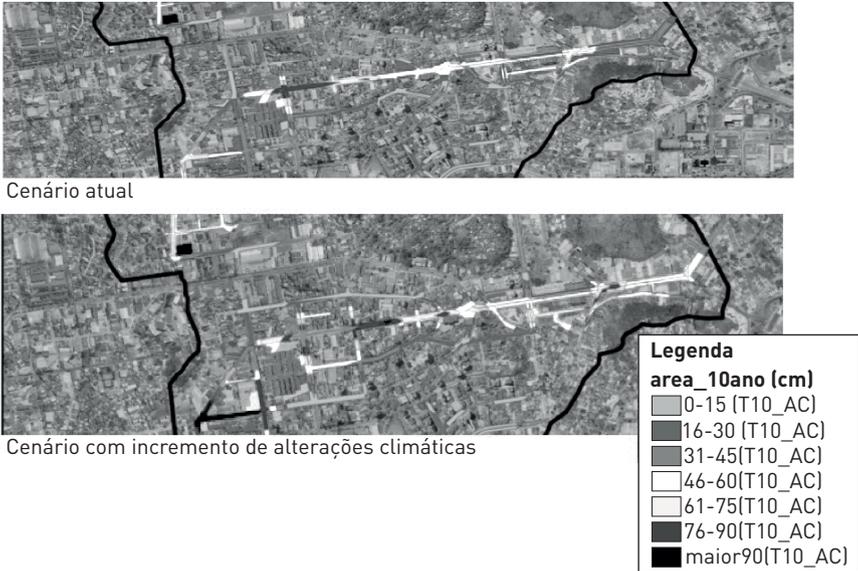
Para o período de retorno de 1 ano, de acordo com os resultados das simulações SWMM, os coletores entram em carga em quatro áreas da bacia. Para o período de retorno de 1 ano, com incremento das alterações climáticas, a área central da bacia de Bento Ferreira sofre um aumento de área inundada de aproximadamente 70% em comparação com o cenário anterior (Figura 5).



**Figura 5. Comparação entre áreas inundadas no cenário atual e no cenário com incrementos das alterações climáticas, para o período de retorno de 1 ano**

Fonte: Elaboração própria.

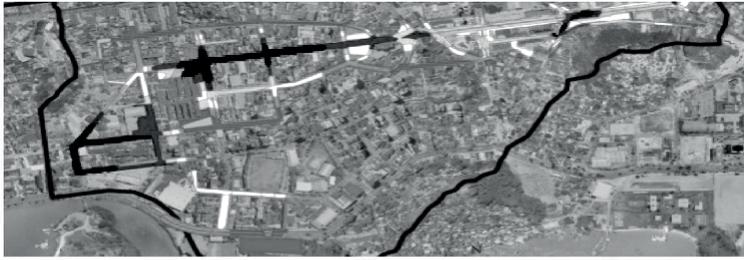
Para as inundações com o período de retorno de 10 anos houve um volume extravasado maior que alcançou parte do bairro de Lourdes, a Avenida César Hilal, a porção sul do bairro Bento Ferreira, parte do bairro Monte Belo e parte do bairro Santa Lúcia, nas porções pertencentes à bacia de Bento Ferreira. Para o período de retorno de 10 anos, o volume da inundação aumentou 17% em comparação ao primeiro cenário (Figura 6).



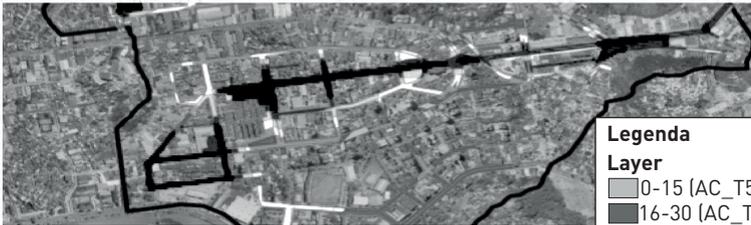
**Figura 6. Comparação entre áreas inundadas no cenário atual e no cenário com incrementos das alterações climáticas, para o período de retorno de 10 anos**

Fonte: Elaboração própria.

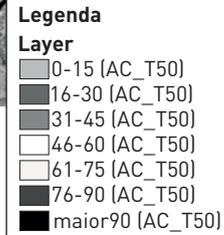
Para o período de retorno de 50 anos houve um incremento substancial do volume extravasado. As alturas mais significativas de inundação encontram-se nas proximidades do Hospital da Polícia Militar e nas proximidades da sede de jornal e televisão, Rede Gazeta, e parte da Avenida Cesar Hilal, nas proximidades da Secretaria Estadual de Educação (Sedu). Para o período de retorno de 50 anos com o incremento das alterações climáticas, a área atingida quase que dobrou. A altura de água mais elevada localiza-se na Avenida Cesar Hilal (Figura 7).



Cenário atual



Cenário com incremento de alterações climáticas



**Figura 7. Comparação entre áreas inundadas no cenário atual e no cenário com incrementos das alterações climáticas, para o período de retorno de 50 anos**

Fonte: Elaboração própria.

Foram realizadas simulações com todos os cenários e períodos de retorno, incluindo no sistema as melhorias propostas pelo PDDU, ou seja, melhorias de trechos críticos do sistema de drenagem, implantação de quatro reservatórios enterrados e melhorias na capacidade das bombas das estações elevatórias.

### 7.3.2 Índice de resiliência

Após escolha indicadores e atribuição dos pesos, foi aplicada a Equação IRUI<sub>e</sub>, em que os resultados podem ser observados na tabela de cores a seguir (Quadro 3):

	1SA	10SA	50SA	1AC	10AC	50AC	2A1SA	2A10SA	2A50SA	2A1AC	2A10AC	2A50AC
IRUI												

Sendo:

90 - 100%	Ótimo
75 - 90%	Bom
50 - 75%	Aceitável
30 - 50%	Insuficiente
0 - 30%	Péssimo

**Quadro 3. Indicador de Resiliência Urbana face às Inundações (IRUIe) da área de estudo**

Fonte: Elaboração própria.

Nesse indicador, observa-se que apenas no cenário de construção de reservatórios e para o período de retorno de 1 ano sem alterações climáticas, o nível “bom” foi atingindo. Contudo, em outros cenários e períodos de retorno, a classificação ficou no nível “péssimo”, “insuficiente” ou “aceitável”.

Para aplicação do índice global para a avaliação da resiliência urbana face às inundações, foi aplicada a Equação ARUIg em um dado cenário, ponderando todos os períodos de retorno propostos. O resultado da aplicação da avaliação de resiliência urbana face às inundações consta no Quadro 4.

	Cenário Atual	Cenário de Alterações Climáticas	Cenário Atual com Intervenções Estruturais	Cenário de Alterações Climáticas com Intervenções Estruturais
ARUI				

Sendo:

90- 100%	Ótimo
75 - 90%	Bom
50 - 75%	Aceitável
30 - 50%	Insuficiente
0 - 30%	Péssimo

**Quadro 4. Índice global para a avaliação da Resiliência Urbana face às Inundações (ARUIg) na área de estudo**

Fonte: Elaboração própria.

## Conclusões

De acordo com os resultados, regista-se uma melhoria da resiliência para os cenários com implantação de reservatórios, passando da classificação “insuficiente” para a classificação “aceitável”. O melhor resultado obtido tem lugar, naturalmente, para o período de retorno de 1 ano, sem efeitos das alterações climáticas. Nesse caso, a classificação passa, com as modificações estruturais, de “aceitável” para “bom”.

O índice global para a avaliação da Resiliência Urbana face às Inundações (ARUIg) nos cenários atuais e sob efeito das alterações climáticas resulta em “insuficiente”, enquanto para os cenários com melhorias estruturais a classificação passa a “aceitável”.

Além disso, também podem ser propostas intervenções de reestruturação urbana e paisagística, retirada de equipamentos urbanos importantes das áreas de risco (como hospitais, edificações significativas, vias metropolitanas etc.) e investimentos em prevenção e aviso.

Conforme as simulações demonstradas nesse estudo, se fazem necessários outros mecanismos de resiliência às inundações, além das obras de melhorias no sistema de drenagem e nas vias. Como exemplos, é possível citar obras menores de controle na fonte, como passeios com pavimentos porosos, trincheiras de infiltração em locais apropriados e incentivos à construção de prédios com fachadas e/ou telhados verdes, para haja um aumento da infiltração e uma diminuição do escoamento superficial em áreas-chave.

## Referências

ALBINO, Jacqueline; GIRARDI, Gisele; NASCIMENTO, Kleverton Alencastre do. **Erosão e progradação do litoral brasileiro** – Espírito Santo. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006.

ARUP. **City Resilience Index Research Report Volume 3 Urban Measurement Report**. London: ARUP International Development and the Rockefeller Foundation, 2014.

ARUP; THE ROCKEFELLER FOUNDATION. **City resilience index** – Understanding and measuring city resilience. 2016 Disponível em: <https://bit.ly/3pPIUZY>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BAHADUR, Aditya; WILKINSON, Emily; TANNER, Thomas. Measuring Resilience – An analytical review. **Climate and Development**, 2015.

BÉNÉ, Christophe *et al.* **Resilience: New Utopia or New Tyranny? Reflection about the Potentials and Limits of the Concept of Resilience in Relation to Vulnerability-Reduction Programmes**. **Institute of Development Studies (IDS) Working Papers**, n. 405, 2012.

BROWN, Craig; SHAKER, Richard R.; DAS, Runa. A review of approaches for monitoring and evaluation of urban climate resilience initiatives. **Environ. Dev. Sustain.**, v. 20, p. 23-40, 2016.

CARE POVERTY ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE NETWORK. **Understanding vulnerability to climate change: insights from application of CARE's climate vulnerability and capacity analysis (CVCA) methodology**, 2011.

COBRADE. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3zH67RC>. Acesso em: 25 fev. 2023.

COELHO, Andre Luiz Nascentes. Método de análise hierárquica (AHP) aplicado a inundação urbana após evento de chuva concentrado. **Geofocus**, n. 20, p. 183-199, 2017.

DAVOUDI, Simin; PORTER, Libby. Resilience, a bridging concept or a dead end? **Planning Theory and Practice**, v. 13, n. 2, p. 299-307, 2012.

DENTON, Fatima *et al.* Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development. In: **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** [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press; New York: United Kingdom, 2014, p. 1101-1131.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3h4CKIH>. Acesso em: 15 jun. 2017.

FARIAS, José Almir. Resiliência: um bom conceito para o projeto e a reforma urbana? In: ENANPUR, 17., 2017, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 2017.

FIGUEIREDO, Lorena; HONIDEN, Taku; SCHUMANN, Abel. Indicators for Resilient Cities. **OECD Regional Development Working Papers 2018/02**, 2018.

FOLKE, Carl. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. **Glob. Environ. Chang.**, v. 16, n. 3, p. 253-267, 2006.

GUNDERSON, Lance H. Ecological Resilience—in theory and application. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 31, p. 425-439, 2000.

HOLLING, Crawford Stanley. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 4, p. 1-23, 1973.

HOLLING, Crawford Stanley. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. **Ecosystems**, v. 4, n. 5, p. 390-405, 2001.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://bit.ly/2vwMERt>. Acesso em: 20 fev. 2023.

INCAPER. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Sistema de Informações Meteorológicas**. Disponível em: <https://bit.ly/3fAMxzx>. Acesso em: 20 fev. 2023.

IPCC. **Aquecimento Global de 1,5°C**. Sumário para Formuladores de Políticas. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Versão em português, publicada pelo MCTI; Brasil, 2018.

IPCC. **Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectorial Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. New York, 2014.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

KLUG, Leticia. Resiliência e ecologia urbana. In: COSTA, Marco Aurélio; MAGALHÃES, Marcos Thadeu Queiroz; FAVARÃO, Cesar Buno (orgs.). **A nova agenda urbana e o Brasil: insumos para sua construção e desafios a sua implementação**. Brasília: Ipea, 2018, p. 83-92.

MEEROW, Sara; NEWELL, Joshua Peter; STULTS, Melissa. Defining urban resilience: a review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38-49, 2016.

MERCER, Jessica. Disaster risk reduction or climate change adaptation: are we reinventing the wheel? **J. Int. Dev.**, v. 22, n. 2, p. 247-264, 2010.

NELSON, Donald R. Adaptation and resilience: Responding to a changing climate. Wiley Interdiscip. **Rev. Clim. Chang.**, v. 2, n. 1, p. 113-120, 2011.

NORRIS, Fran H. *et al.* Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. **American Journal of Community Psychology**, v. 41, n. 1-2, p. 127-150, 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA – PMV. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Vitória** – PDDU. Resumo geral do PDDU, 2008. Disponível em: <https://bit.ly/3T57BvM>. Acesso em: 20 fev. 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3Uo3vjf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

RESILIENCE ALLIANCE. **A Resilience Alliance Initiative for Transitioning Urban Systems towards Sustainable Futures**. Camberra: CSIRO, 2007.

- SANTOS, Rhavena Barbosa dos *et al.* Construção de um índice de vulnerabilidade humana à mudança do clima para o contexto brasileiro: a experiência do Espírito Santo. **Saúde Soc.**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 299-321, 2019.
- SCHIPPER, E. Lisa F.; LANGSTON, Lara. A comparative overview of resilience measurement frameworks. **Working Paper No. 422**, Overseas Development Institute, London, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/3FOa7U7>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- SHARIFI, Ayyoob; YAMAGATA, Yoshiki. Urban Resilience Assessment: Multiple Dimensions, Criteria, and Indicators. *In*: YAMAGATA, Yoshiki; MARUYAMA, Hiroshi (eds.). **Urban Resilience**. Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Cham: Springer, 2016, p. 259-276.
- STRENGARI, Luis Augusto Bertoni *et al.* **Seminários Cidades Resilientes a inundações**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – PHA, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- THE WORLD BANK. **Building Resilience**: Integrating climate and disaster risk into development. Lessons from World Bank Group Experience. Washington DC: The World Bank, 2013.
- THE WORLD ECONOMIC FORUM. **The global risk Report**. Geneva: WEF, 2020.
- TYLER, Stephen; MOENCH, Marcus. A framework for urban climate resilience. **Climate and Development**, v. 4, n. 4, p. 311-326, 2012. Disponível em: <https://bit.ly/3U41ERd>. Acesso em: 05 mar. 2023.
- UN-HABITAT. United Nations Human Settlements Programme. **Trends in Urban Resilience 2017**. Nairobi: UN-Habitat, 2017.
- UNISDR. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction**: Risk and Poverty in a Changing Climate. Geneva: UNISDR, 2009.
- WALKER, Brian *et al.* Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. **Ecology and Society**, v. 9, n. 2, 2004.



## CAPÍTULO 5

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA NO ESPÍRITO SANTO

*Marcos Góes Oliveira*  
*Madles Queiroz Martins*  
*Fábio Luiz Partelli*

### **Introdução**

A mudança climática global e a previsão de sua continuação no próximo século é uma realidade amplamente aceita (Cook *et al.*, 2016). A agricultura é um setor sensível ao clima, e a variabilidade climática pode afetar a produção agrícola e a produtividade em todo o mundo (Venkatramanan; Shah, 2019).

De acordo com as projeções climáticas futuras, espera-se que ocorra um aumento na duração e na intensidade de ondas de calor extremas e mudanças na distribuição de precipitação, aumento da concentração de gases de efeito estufa, alteração na disponibilidade de água, secas e outros aspectos do clima que estão relacionados com os efeitos da mudança climática e que trarão impactos importantes na agricultura, na subsistência rural e na segurança alimentar (IPCC, 2018; Valizadeh *et al.*, 2018).

Para o Brasil, as projeções das mudanças climáticas sugerem aumento da temperatura média e da precipitação, com variação de intensidade a depender da região do país, podendo inclusive haver inversão em função da época do ano (Chou *et al.*, 2016). Nesse contexto, os impactos das mudanças climáticas afetam diretamente a agricultura brasileira, especialmente porque o setor agrícola promove geração de divisas (balança comercial brasileira) e manutenção de empregos no campo, chegando a contribuir diretamente com 24,3% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional em 2020 (FAO, 2019). O setor agrícola também responde por 38,5% das exportações totais nacionais, colocando o país como um dos maiores exportadores mundiais de

commodities agrícolas (OCDE, 2018), devido ao desenvolvimento tecnológico (pesquisa e formação de recursos humanos).

A integração de estratégias de mitigação dos impactos causados pelas mudanças climáticas, aliada à adaptação de práticas agrícolas sustentáveis, trilha um caminho para uma agricultura inteligente que garanta a produção de alimentos (Venkatramanan *et al.*, 2020), que é fonte de grande preocupação para os pesquisadores e para a sociedade. Atualmente, o Brasil é o terceiro país que mais publica artigos científicos em agricultura e o primeiro em agricultura Tropical da base *Scopus* e *Web of Science*, incluindo estudos que analisaram os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura brasileira.

Diversos estudos analisaram os efeitos das variações climáticas em regiões específicas considerando eventuais mudanças sobre variáveis atmosféricas (concentrações de CO<sub>2</sub>, precipitação e temperatura) em culturas como: cana-de-açúcar (Zullo; Pereira; Koga-Vicente, 2018), milho (Costa *et al.*, 2009), soja (Zanon *et al.*, 2016), pimenta do reino (Oliveira *et al.*, 2018), café sob sistema de cultivo arborizado (Pezzopane *et al.*, 2010; Pezzopane *et al.*, 2011; Partelli *et al.*, 2014; Oliosi *et al.*, 2016), café sob temperaturas supraótimas com elevações de CO<sub>2</sub> (Martins *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2016) e em condições de seca (Dubberstein *et al.*, 2018; 2020).

O estado do Espírito Santo tem uma das maiores produções agrícolas por habitante e por km<sup>2</sup>. Especificamente no caso do café, cultura da qual o eEstado é o segundo maior produtor do país (Conab, 2021), esses valores são três vezes maiores, comparado ao maior produtor de café do Brasil (Minas Gerais), ou seja, existe grande eficiência na produção agrícola, sendo grande parte dela feita em pequenas propriedades. Entretanto, mesmo com esse potencial produtivo, por anos consecutivos (de 2014 a janeiro de 2016), uma severa queda na precipitação no estado do Espírito Santo promoveu uma redução da produtividade média do café conilon em três safras seguidas. As quedas foram de, aproximadamente, 20% em 2015, 50% em 2016 e 40% em 2017. A produção foi reestabelecida apenas em 2018, quando foi comparável à produção de 2014 (Conab,

2021). Isso demonstra uma vulnerabilidade dos sistemas agrícolas dessa região devido ao estado frágil das plantas após esse período de déficit hídrico e manutenção de altas temperaturas do ar, com redução do número de plantas e da extensão da área cultivada.

Houve falta de chuva, mas praticamente todas as lavouras eram irrigadas. Portanto, o problema não está relacionado à falta de chuvas, mas à escassez de água que, conseqüentemente, inviabilizou a irrigação. A perda substancial da produção agrícola devido à seca pode ser evitada pelo uso de irrigação suplementar, mas o uso de recursos hídricos subterrâneos e a construção de barragens são alternativas ainda pouco exploradas na região. Em áreas do Mediterrâneo onde ocorrem variações climáticas sem precedentes, comumente marcadas pelo declínio dos padrões pluviométricos (Nassopoulos, 2012), os países enfrentam severa escassez de água anualmente. Então, esses territórios se voltaram para uso de águas subterrâneas, colocando esse recurso à disposição das atividades agrícolas. Ao Norte da Argélia, por exemplo, a exploração média dos aquíferos foi estimada em 80% em 2002 (Boudjadja *et al.*, 2003). Os países do Norte da África, que sofrem com chuvas limitadas (Steyl; Dennis, 2010), dependem principalmente de água subterrânea de aquíferos para satisfazer suas necessidades (Abouelmagd *et al.*, 2012). Dessa forma, esse recurso hídrico oculto pode ser facilmente extraído (Das *et al.*, 2018) e pode atender às necessidades de irrigação (Mehrazar *et al.*, 2020).

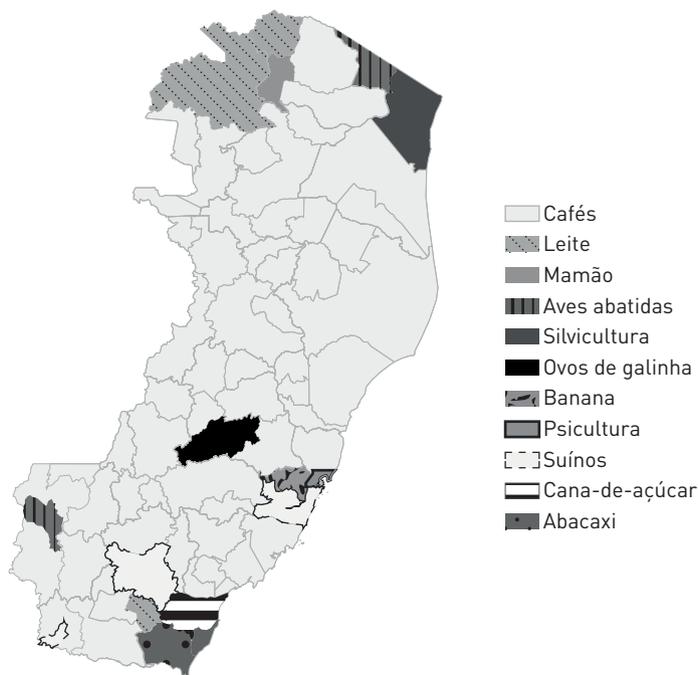
O presente capítulo apresenta os principais desafios da agricultura sob impactos das mudanças climáticas, notadamente a emissão de gases, as respostas fisiológicas das plantas e as estratégias de mitigação e de adaptação a essas alterações.

## **1. O agronegócio do estado do Espírito Santo e mudanças climáticas**

O agronegócio é responsável por mais de 30% do Produto Interno Bruto do estado do Espírito Santo (IJSN, 2011). Verifica-se que o agronegócio do Espírito Santo apresenta grande diversifica-

ção, atuando nos setores de apicultura, avicultura, aquicultura e pesca, cafeicultura, floricultura, fruticultura, olericultura, plantas aromáticas, condimentares e medicinais, pecuária, grãos (milho e feijão), cana-de-açúcar e silvicultura. Apesar da grande diversidade na produção agrícola do estado, o café é a cultura predominante no âmbito do agronegócio, sendo considerada cultura principal em 61 dos 78 municípios do Espírito Santo (Figura 1).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e o segundo maior mercado consumidor (IOC, 2021). O estado do Espírito Santo merece destaque, pois é o segundo maior produtor nacional desse produto (arábica e conilon), e o maior produtor de café conilon (produz 80% do café conilon nacional) (Conab, 2021). De acordo com o último levantamento da produção agrícola municipal, a quantidade de café produzida foi de 811,080 toneladas (IBGE, 2018). Cerca de 75 mil estabelecimentos agropecuários são integrantes da cafeicultura do Espírito Santo, movimentando economicamente R\$ 2.854,038 bilhões em termos de valor de sua produção de café (IBGE, 2017). Dessa maneira, essa atividade representa uma importante atividade agrícola e econômica para o estado.



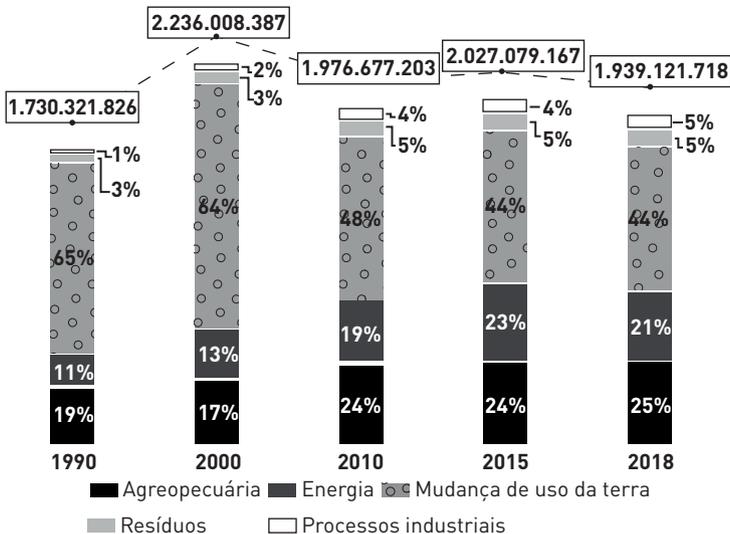
**Figura 1. Mapa dos principais produtos agrícolas por município do Espírito Santo**  
 Fonte: IBGE, 2017.

Sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura, deve-se considerar que os cenários previstos de aquecimento global apontam para uma sensibilidade do café conilon no estado do Espírito Santo (Pezzopane *et al.*, 2010), podendo ocasionar reduções no crescimento das plantas, aumento da probabilidade de formação de flores estéreis (tipo “estrelinha”) (Camargo, 2001), do aborto (Camargo, 2010) e da queima da flor antes da antese, afetando a germinação e crescimento do tubo polínico e, conseqüentemente, a fecundação do ovário, impossibilitando a produção do fruto (Custódio *et al.*, 2014). No caso de formação do fruto, pode ainda afetar a maturação do fruto e, portanto, causar perda de qualidade (Santos *et al.*, 2015). Isso pode implicar na migração da cultura para regi-

ões com temperaturas mais amenas, uma vez que há possibilidade de cultivar alguns genótipos de *C. canephora* em áreas de alta altitude, sob condições de baixa temperatura (Barbosa *et al.*, 2014; Partelli *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2019; 2020). Além do café conilon, as mudanças climáticas podem causar impactos também em outras culturas importantes do estado, como a de pimenta do reino (Oliveira *et al.*, 2018), banana (Araújo *et al.*, 2015), cedro australiano (Pezzopane *et al.*, 2010) e seringueira (Araújo *et al.*, 2014; 2016).

## 2. Emissões de gases do efeito estufa pelo setor agropecuário no Brasil e no Espírito Santo

No Brasil, as emissões do setor de agropecuária permaneceram estáveis em 2018, com 492,2 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Trata-se de uma queda de 0,7% em relação a 2017, quando o país emitiu 495,9 milhões de toneladas de gases de efeito estufa nesse setor (Figura 2).

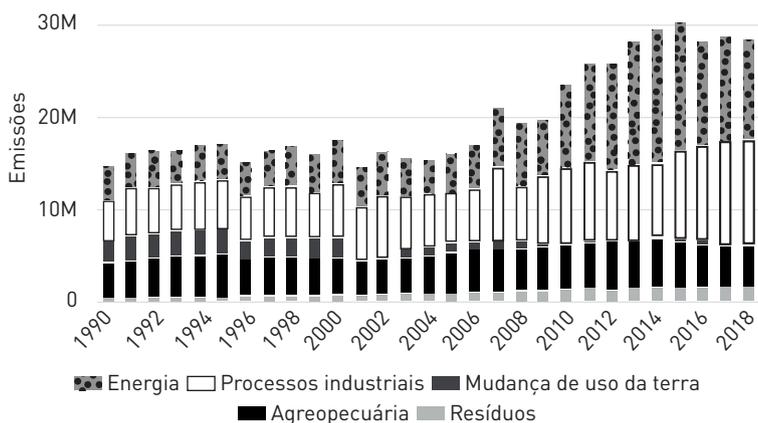


**Figura 2. Emissões de gases de efeito estufa no Brasil, por setor, expresso em tonCO<sub>2</sub>, no período de 1990 a 2018**

Fonte: SEEG e Revista Galileu (2018).

De acordo com o sistema de emissão de gases do efeito estufa (SEEG, 2019), o estado do Espírito Santo respondeu pela emissão de 28.554.107 tonCO<sub>2</sub> atmosférico no ano de 2018. Esse número é inferior ao do ano de 2016, quando o Espírito Santo emitiu cerca de 31 MtCO<sub>2</sub> (Figura 3).

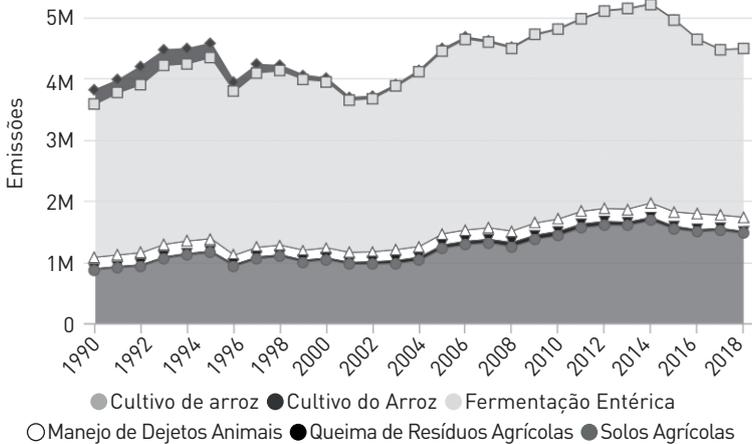
Durante o período em análise, apesar das oscilações, as emissões da agropecuária do Espírito Santo apresentaram um pequeno crescimento (Figura 3). O comportamento de crescimento da emissão de CO<sub>2</sub> pelo setor de resíduos se mostrou linear. O setor de mudança de uso da terra e floresta revelou uma redução significativa em termos de emissão de gases de efeito estufa. No período entre 1990 e 2000 foram verificados os maiores valores de emissões responsáveis pelo setor de mudança no uso da terra. Tal comportamento pode ser considerado importante, pois evidencia a queda do desmatamento de área de Mata Atlântica em terras do estado do Espírito Santo. Os processos industriais e o setor de energia apresentaram tendências de crescimento semelhantes, registrando aumento de aproximadamente 4 vezes entre 1990 e 2018.



**Figura 3. Gráfico de estimativas de emissões de gases de efeito estufa do Espírito Santo de 1990 até 2018**

Fonte: Ciência e Clima (2018).

As principais fontes de emissão direta da agropecuária no estado do Espírito Santo são o rebanho bovino, que emite altas quantidades de metano ( $\text{CH}_4$ ) por fermentação no rúmen dos animais (a chamada fermentação entérica), e o manejo de solos agrícolas, sobretudo por meio da aplicação de fertilizantes nitrogenados. Ainda, outras fontes de emissão importantes são o manejo de dejetos animais, o cultivo de arroz irrigado (que também emite metano) e a queima de resíduos, como palha de cana-de-açúcar (Figura 4) (SEEG, 2018).



**Figura 4. Evolução das estimativas de emissões de gases de efeito estufa do setor agropecuário capixaba no período de 1990 a 2018 em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>**

Fonte: SEEG (2019).

As emissões de gases de efeito estufa promovidas pelo homem por meio da utilização da terra para produção de alimentos envolve reações químicas de metanogênese, de oxidação e de desnitrificação. No que se refere à metanogênese, verifica-se sua ocorrência nas atividades produtivas promovidas pela pecuária, produção de arroz e pela decomposição matéria de matéria orgânica. A decomposição de matéria orgânica é o processo de degra-

dação de substâncias orgânicas complexas em substâncias mais simples, através de processos químicos ou biológicos. A matéria orgânica pode ser decomposta por meio de reações aeróbicas (na presença de oxigênio), produzindo dióxido de carbono e água, ou por reações anaeróbicas (na ausência de oxigênio) e, nesse caso, produzindo metano e dióxido de carbono.

O solo é considerado o principal reservatório temporário de carbono no ecossistema (Bruce *et al.*, 1999) por apresentar, em média, 4,5 vezes mais carbono do que a biota e 3,3 vezes mais do que a atmosfera (Lal, 2004). Com esses valores de estoque de carbono presente no solo e na biota, é evidente que a preservação desses reservatórios é de grande importância para o equilíbrio da concentração do gás carbônico na atmosfera (Partelli *et al.*, 2009; Evangelista *et al.*, 2012; Partelli *et al.*, 2012). Vale destacar que há outras fontes de emissão de gases não controladas pelo homem, como, por exemplo, erupções vulcânicas.

Pode-se notar que, mesmo com o aumento das queimadas, desmatamento e mudanças no uso da terra, o conjunto solo e biota possui capacidade de acumular mais que o dobro do que pode emitir de CO<sub>2</sub> (Figura 5). Considerando o período de 2007 a 2016, o conjunto solo e biota aprisionaram cerca de 11,2 giga toneladas de CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>) e emitiram cerca de 5,2 GtCO<sub>2</sub>. Em conclusão, observa-se que o conjunto solo e biota é um sistema que consegue retirar da atmosfera cerca de 6 GtCO<sub>2</sub> por ano, e esse valor equivale a cerca de três vezes mais o valor da emissão de gases do efeito estufa promovida pelo Brasil (Figura 5).



*Nota:* Valores são uma média de 2007 a 2016

*Fontes:* Relatório Especial do IPCC sobre Mudança Climática e Solo; SEEG.

**Figura 5. Saldo de emissão e remoção de CO<sub>2</sub> atmosférico realizado em conjunto pelo solo e biota no Brasil no período de 2007 a 2016**

Fonte: IPCC/SEEG. Adaptado por Grupo Consultivo de Especialistas (2006).

Nota-se que o conjunto solo e biota é importante, pois o sequestro e o acúmulo de carbono contribuem para regular e amenizar os impactos das emissões de gases de efeito estufa que induzem as mudanças climáticas. Entretanto, a vida desse conjunto é sensível aos aumentos de temperaturas e das secas, que agem prejudicando a capacidade desse conjunto em agir no sequestro de carbono. Nesse sentido, a diminuição dos desmatamentos pode contribuir para diminuir a emissão de carbono, tanto por absorver carbono por meio da fotossíntese, quanto pelo fato de disponibilizar material para decomposição dos resíduos orgânicos de árvores cortadas. Além disso, a vegetação preservada protege os solos da exposição à temperatura elevada. Os recursos naturais devem ser preservados pelo uso sustentável da terra, caso contrário, esse sumidouro de carbono será enfraquecido e, conseqüentemente, irá prejudicar os serviços ecossistêmicos e o ciclo da vida selvagem.

### **3. Respostas fisiológicas das plantas à elevação de temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> e déficit hídrico**

De acordo com Assad *et al.* (2016), a tendência de aumento na frequência de dias com temperaturas superiores a 34 °C nos próximos anos mostra-se altamente prejudiciais às plantas. Logo, essas alterações climáticas aumentarão as vulnerabilidades agrícolas, sociais e econômicas (Baca *et al.*, 2014). Outros estudos sugerem que, se comprovados os cenários preconizados pelos modelos do IPCC, com provável aumento de 1 °C, 3 °C e 5,8 °C na temperatura média anual global, haverá uma drástica redução do cultivo dos cafeeiros em diversas regiões do Brasil nos próximos 100 anos (se mantidas as condições genéticas e fisiológicas das atuais variedades) (Asad, 2004). Entretanto, após 16 anos essas mudanças não foram confirmadas.

É importante observar como a evolução de processos vitais das plantas conseguem acompanhar a velocidade de transformação atmosférica e adaptar-se numa velocidade compatível com as transformações atmosféricas. Existe um desafio inerente à biologia das plantas, pois com o aumento do nível de CO<sub>2</sub> atmosférico, o sistema bioquímico das plantas deve apresentar recursos genéticos para despertar mecanismos de defesa capazes de adaptá-las às novas condições de sobrevivência impostas. Em outras palavras, é necessário entender se a seleção natural de genótipos será capaz de manter plantas para um futuro com alta concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. Nesse contexto, a comunidade científica mundial tem se dedicado a estudar os impactos potenciais das mudanças climáticas no crescimento, desenvolvimento, genética e melhoramento, bem como o rendimento das culturas agrícolas. Esses estudos são relevantes por ajudarem a prever mudanças no manejo e adaptação das culturas (Wertin *et al.*, 2010).

#### ***3.1 Altas temperaturas***

Temperaturas extremas, dependendo de sua intensidade, duração e velocidade de imposição, prejudicam os processos metabólicos

celulares com consequências negativas para o funcionamento fotosintético, reduzindo a produção de biomassa vegetal e diminuindo a taxa de crescimento, rendimento e produtividade (Xu *et al.*, 2015; Ovalle Rivera *et al.*, 2016; Semedo *et al.*, 2018).

Nas plantas, a fotossíntese e a respiração estão entre os processos metabólicos mais sensíveis ao aumento da temperatura, pois podem causar desnaturação, aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (DaMatta; Ramalho, 2006) e síntese de etileno (Djanaguiraman; Prasad, 2010). Além disso, temperaturas supraótimas podem reduzir a condutividade dos estômatos e o uso de energia leve, bem como alterar a ultraestrutura do tilacoide e a difusão de gás através dos mesófilos (Santos *et al.*, 2015, Rodrigues *et al.*, 2016), com um impacto direto no ganho líquido de carbono. Assim, temperaturas mais quentes podem afetar o rendimento da cultura em diferentes períodos fenológicos (Covre *et al.*, 2016).

Na região do Espírito Santo, a ocorrência de temperaturas que atingem até 40 °C é comum no verão e geralmente esse nível é ultrapassado durante a fase de enchimento de grãos, que leva a uma murcha de grãos e, conseqüentemente, a reduções significativas no rendimento das culturas (DaMatta *et al.*, 2017). A orientação do plantio pode ser fator determinante no desenvolvimento vegetal, pois a temperatura foliar pode ser até 10 °C superior à temperatura do ambiente, ou seja, em condição de temperatura ambiente extrema, a temperatura foliar pode ser ainda maior (Bis *et al.*, 2019; 2020). Durante o florescimento, especialmente se associado a uma estação seca prolongada, a alta temperatura do ar pode causar aborto de flores, impactando diretamente a produção (Valetine *et al.*, 2010).

Em termos gerais, as altas temperaturas são prejudiciais para a produção vegetal da região e a atenuação da radiação solar incidente, da temperatura e da demanda evaporativa utilizando um sistema agroflorestal pode resultar em melhores condições para a manutenção das trocas gasosas, com efeitos positivos sobre a produção (Pezzopane *et al.*, 2010; 2011; Partelli *et al.*, 2014; Oliosi *et al.*, 2016), especialmente em regiões marginais nas quais o cultivo de café é caracterizado

por sofrer com o déficit de água, normalmente associado a temperaturas extremas e ao excesso de irradiação (Venâncio *et al.*, 2020).

### **3.2 Déficit hídrico**

As plantas apresentam respostas fisiológicas de acordo com a exposição ao estresse. Dentre os mecanismos associados com a tolerância à seca, aqueles relacionados com o controle estomático, com o sistema radicular e com a condutividade hidráulica parecem ser os mais afetados (DaMatta; Ramalho, 2006; Deuner *et al.*, 2011). O déficit hídrico pode induzir perdas de produtividade via decréscimos da taxa de fotossíntese, visto que há menor acesso do CO<sub>2</sub> aos sítios de carboxilação (fixação do carbono), ocasionada pelo fechamento estomático. A falta de água pode, ainda, provocar o desequilíbrio entre a captura de energia e o seu uso fotoquímico, contribuindo para a sobre-excitação da maquinaria fotossintética e, em última análise, causar danos devido à, por exemplo, superprodução de espécies reativas de oxigênio, caso o sistema antioxidativo foliar não seja suficientemente robusto (Fortunato *et al.*, 2010). De fato, sob alta demanda evaporativa da atmosfera, genótipos com alta sensibilidade à seca podem reduzir a abertura dos estômatos, conseguindo reduzir a perda de água e níveis adequados de hidratação da planta (DaMatta; Ramalho, 2006). Por outro lado, genótipos que respondem pouco às variações da demanda evaporativa podem sofrer uma desidratação mais rápida, apresentando baixa tolerância à seca (Pinheiro *et al.*, 2005).

Deve-se ainda destacar o efeito da arquitetura da planta sobre a transpiração, já que genótipos de porte baixo e com copas densas, apresentam menores taxas de transpiração da copa, pois a transpiração da folha tende a umidificar o ar em volta das folhas mais próximas, diminuindo a condutância da camada limítrofe na superfície foliar (DaMatta; Ramalho, 2006). O comportamento do sistema radicular é igualmente um importante fator de adaptação/tolerância à seca. Há clones de café conilon que apresentam grande volume de raízes em profundidade, podendo este ser um mecanismo de tole-

rância à seca a ser explorado (Silva *et al.*, 2020). Geralmente, genótipos com sistema radicular mais profundo apresentam capacidade de captação de água por períodos mais longos do que genótipos com sistema radicular mais superficial (DaMatta; Ramalho, 2006). Além disso, uma adequada condutividade hidráulica do sistema radicular pode permitir rápida hidratação dos tecidos e, conseqüentemente, permitir um bom funcionamento do sistema fotossintético em períodos com alta demanda evaporativa (Pinheiro *et al.*, 2005).

### **3.3 Concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico**

O crescimento das plantas e a produção de biomassa estão intimamente ligados à taxa de absorção de CO<sub>2</sub> e à assimilação através de rotas fotossintéticas. Nesse sentido, um aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico pode promover um aumento da taxa de fotossíntese devido a uma maior disponibilidade de CO<sub>2</sub> como substrato para carboxilação. Isso reduz simultaneamente a taxa de fotorrespiração, pois ocorre inibição competitiva com o O<sub>2</sub> sobre a ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) (Martins *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2016).

De fato, o acúmulo de fotoassimilados pode desencadear uma cascata de sinalização que suprime a expressão gênica e a atividade e/ou quantidade das enzimas fotossintéticas, contribuindo para a redução da velocidade máxima de fixação de carbono (Zhu *et al.*, 2012). Desse modo, o aumento estimado do CO<sub>2</sub> nos próximos anos pode ter um impacto positivo no balanço mineral (Martins *et al.*, 2014) e na assimilação de carbono (Rodrigues *et al.*, 2016), pois a planta ficaria mais tolerante e se recuperaria mais rápido ao ser submetida à alta temperatura. Isso poderia ter efeito positivo também na produtividade (DaMatta *et al.*, 2019), pois ajudaria na preservação da qualidade do grão de café sob temperaturas supraótimas (Ramalho *et al.*, 2018a), caso haja água suficiente disponível. Em plantas de café sob temperatura adequada, o ar elevado [CO<sub>2</sub>] promoveu apenas um efeito de “diluição” moderada dos minerais (de 7 a 25%), dependendo do mineral e do genótipo considerado (Martins *et al.*, 2014).

### **3.4 Aumento de CO<sub>2</sub> integrado às alterações de temperatura e de déficit hídrico**

Em condições de campo, a ocorrência simultânea de várias limitações ambientais (com destaque para a baixa disponibilidade hídrica e temperaturas extremas) é a situação mais frequente. Alguns estudos têm mostrado um efeito de mitigação do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> relativo a estresses ambientais, tendo-se observado o atraso ou redução do impacto da seca na limitação estomática e não -estomática da fotossíntese em milho (*Zea mays*) (Markelz *et al.*, 2011) e em eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Duan *et al.*, 2013), assim como no metabolismo foliar da batateira (*Solanum tuberosum*) (Barnaby *et al.*, 2015). Efeitos de mitigação parcial do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> foram igualmente reportados, face a condições de salinidade, no processo de fotossíntese em cevada (*Hordeum vulgare*), via menor impacto no funcionamento fotoquímico e bioquímico da fotossíntese (Pérez-López *et al.*, 2012).

Sabe-se que o aumento da temperatura promove proporcionalmente mais a respiração do que a fotossíntese e, ao aumentar proporcionalmente mais a solubilidade do O<sub>2</sub> em relação à do CO<sub>2</sub>, a taxa de carboxilação será reduzida, enquanto a de fotorrespiração será aumentada (Ainsworth; Rogers, 2007). Dessa forma, nas plantas C<sub>3</sub> a taxa de fotossíntese líquida será mais afetada quando submetidas a condições de temperatura supraótimas. Contudo, estima-se que o aumento atmosférico de CO<sub>2</sub> proporcionará um maior estímulo da taxa de fotossíntese em temperaturas mais altas, ultrapassando ou, pelo menos, atenuando o impacto das temperaturas supraótimas na fotossíntese (DaMatta *et al.*, 2010; Kirschbaum, 2011).

O aumento da demanda evaporativa e temperaturas elevadas podem promover o fechamento estomático (a fim de evitar a desidratação), levando à redução da fotossíntese. No entanto, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> aumenta o seu gradiente de pressão, podendo a taxa de fotossíntese ser mantida (ou aumentada) com menor condutância estomática, o que terá ainda, como consequência, um aumento da eficiência do uso da água (Ramalho *et al.*, 2013). De

fato, quando houver projeção de decréscimo nos níveis de precipitação, é previsto que isso ocorra em conjunto com o aumento da temperatura, e poderá haver redução da fotossíntese líquida nas atuais concentrações de CO<sub>2</sub>. Porém, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pode parcialmente mitigar os efeitos do déficit hídrico (Wertin *et al.*, 2010). O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pode, ainda, promover o aumento de compostos osmóticos, contribuindo para a manutenção do estado de hidratação adequada em condições de decréscimo de disponibilidade hídrica (Oliveira *et al.*, 2013).

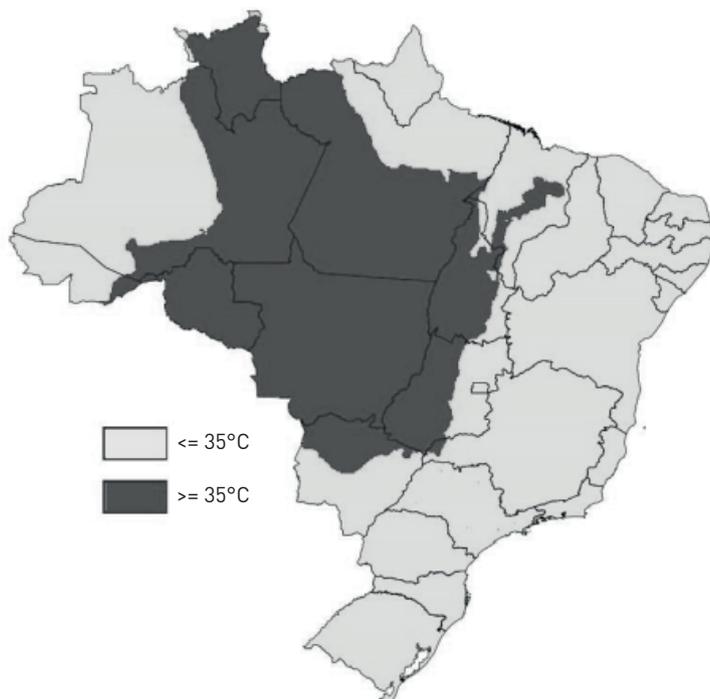
Além disso, o aumento de fotossíntese sob alta concentração de CO<sub>2</sub> (valores até 50% mais altos) (Ainsworth; Rogers, 2007; Kirschbaum, 2011; Ramalho *et al.*, 2013) poderá disponibilizar maiores quantidades de esqueletos de carbono, que poderão ser investidos, particularmente, no sistema radicular, aumentando a capacidade de exploração do solo em profundidade. Isso possibilita aos genótipos com essa aptidão lidar com maior eficiência com uma possível falta de água no solo por determinados períodos.

Considerando-se os efeitos conjuntos de aumento de CO<sub>2</sub>, temperatura e déficit hídrico, estudos deverão ser realizados para elucidar os mecanismos de tolerância/adaptação e, assim, possibilitar o melhoramento genético e a obtenção de genótipos adaptados às novas condições climáticas. Apesar de grande parte das informações apresentadas no presente capítulo estarem relacionados à cultura do café, esses mecanismos de respostas, tipos de estresses, bem como os aspectos fisiológicos e bioquímicos, se aplicam à grande maioria das culturas.

#### **4. Vulnerabilidades do setor agrícola frente às mudanças climáticas**

O Brasil, tal como outros países localizados na região de clima tropical, apresenta, de certa maneira, maior vulnerabilidade à alta frequência de ocorrência de temperaturas acima de 34 °C. Esse fato traz consequências para a agricultura, pois induz o abortamento de flores do café, da laranja e do feijão, causa morte de frangos em

aviários, abortamento nas porcas e queda na produção de leite. As zonas representadas pela cor vermelha indicam que, de acordo com o cenário de altas emissões RCP 8.5 do IPCC AR5 para o ano de 2085, esses locais serão altamente vulneráveis para produção agrícola, e isso oferece risco à segurança alimentar (Figura 6).



**Figura 6. Vulnerabilidade da Produção Agrícola no Brasil para o ano de 2085, considerando temperaturas  $> 35^{\circ}\text{C}$  em cenário do IPCC AR5 de altas emissões (RCP 8.5)**  
Fonte: Embrapa/CNPTIA (2015).

Ao considerar um cenário mais pessimista (RCP 8.5), o software do Sisvuclima calcula que podem ocorrer alterações climáticas significativas nos municípios do Espírito Santo para o período de 2041 a 2070, principalmente na parte Sul do estado. Nessa região, há um indicativo de um aumento de até  $4,5^{\circ}\text{C}$  em Ibatiba. Em

idades como Brejetuba, Iúna e Irupi, a elevação pode chegar a 4,4 °C. Na capital Vitória, a temperatura poderá aumentar até 2,9 °C.

Em relação ao volume de chuvas, observa-se uma diminuição em todo o estado, mas a porção Norte pode ser a mais afetada. Em Jaguaré, por exemplo, a redução seria de até 44,3% em comparação com o período atual. Em Sooretama e São Mateus, a precipitação diminuiria até 44% e 43,7%, respectivamente. O município menos impactado seria Marechal Floriano, com um percentual negativo de 19,9% em sua pluviosidade (Fiocruz, 2017).

Para o número de dias secos consecutivos ao ano, identifica-se uma tendência no aumento do percentual em todas as regiões do Espírito Santo. No entanto, não há uma homogeneidade. A parte Norte seria a mais afetada pela estiagem, com uma elevação de até 88%, como no caso do município de Sooretama. Em cidades como Nova Venécia, Boa Esperança e Ponto Belo, o incremento pode ser de até 81%. Já no Sul capixaba, o impacto tende a ser menor. Ibitirama e Iúna teriam um acréscimo de 33%, seguidos de Dolores do Rio Preto e Divino de São Lourenço com 34% a mais no período de estiagem em relação ao período atual (Fiocruz, 2017).

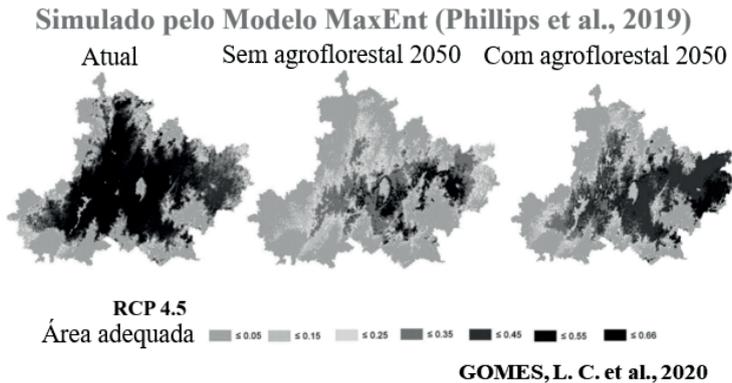
## **5. Estratégias para mitigar os efeitos das mudanças climáticas**

A discussão sobre o sistema global de alimentos contribui para ajudar produtores e consumidores a planejar respostas estratégicas, bem integradas e efetivas para amenizar e enfrentar as mudanças climáticas (Embrapa 2020). No enfrentamento dos desafios do desenvolvimento sustentável e do clima, o tema sobre a adaptação do sistema alimentar frente às mudanças climáticas incentiva os países a implementarem uma gama de respostas específicas no contexto da adaptação e de execução das práticas para amenizar os efeitos das mudanças climáticas e diminuir a vulnerabilidade.

As ações de mitigação abrangem as medidas que visam à redução da emissão dos gases do efeito estufa, o sequestro de carbono nos ecossistemas terrestres e medidas para evitar a emissão de gases. O cultivo

agroflorestal pode ser considerado uma alternativa importante para reduzir os impactos causados pelas mudanças climáticas. Nesse sistema de cultivo ocorre a produção de alimentos em associação com plantas de espécies arbóreas. As espécies arbóreas proporcionam melhoria do conforto térmico das plantas agrícolas, e esse comportamento é motivado pela diminuição das flutuações de temperatura promovida pelo sombreamento das árvores, que reduz a temperatura em 2 °C a 3 °C (Pezzopane *et al.*, 2010; 2011; Partelli *et al.*, 2014; Oliosi *et al.*, 2016). Além disso, esses sistemas podem trazer vários benefícios positivos para as lavouras envolvidas, como mitigar a variabilidade do microclima (Sarmiento-Soler *et al.*, 2019), promover o aumento da umidade do solo e na infiltração de água no solo (Zhu *et al.*, 2019).

Considerando os cenários futuros para o ano de 2050 (Jarvis *et al.*, 2009), pode-se perceber que a utilização de cultivo agroflorestal em lavouras de café tem potencial para conservar maiores áreas adequadas à produção de café, quando comparado a produção de café em lavouras tradicionais. Esse comportamento é observado com maior relevância para condições climáticas de altitudes menos elevadas, na qual o estresse térmico é mais pronunciado e rigoroso.



**Figura 7. Potencial dos sistemas agroflorestais em mitigar os impactos das mudanças climáticas na produção de café**

Fonte: Gomes *et al.* (2020).

Outra prática de mitigação que deve ser considerada é a redução de perdas e desperdícios de alimentos em toda a cadeia alimentar, promovendo o incentivo ao mercado produtor e ao consumidor de alimentos. Esse incentivo pode ocorrer por maiores oportunidades de atendimento aos sistemas alimentares que estão envolvidos na economia sustentável e na queda das emissões de gases do efeito estufa.

Uma ferramenta estratégica e relevante para adaptação às mudanças climáticas é a genética e o melhoramento genético de plantas, que assume extrema importância não apenas em termos de manter ou aumentar a produção de alimento pela criação de plantas mais produtivas, mas também no sentido de promover um sistema de cultivo mais diversificado, com maior sustentabilidade, minimizando os impactos ambientais e, conseqüentemente, as mudanças climáticas (Atlin *et al.*, 2017; Shortridge, 2019; Rodriguez *et al.*, 2020; Kamenya *et al.*, 2021). Como é previsto que a mudança climática aumentará a frequência e intensidade do estresse abiótico, é importante gerar variedades tolerantes ao estresse como uma estratégia de mitigação, incluindo o estudo da planta na parte fisiológica, bioquímica, molecular e genômica, visando a identificação de genes envolvidos com tolerância à seca, ao estresse hídrico, à temperatura extrema, à seleção de materiais mais adaptados e outros.

A utilização de cultivares altamente produtivas é um fator importante, pois eleva a produção de alimentos sem necessitar de novos desmatamentos. Segundo Fazuoli (1986), a obtenção dessas cultivares é resultado de um contínuo trabalho que envolve estratégias sequenciais de melhoramento genético de plantas, que vêm sendo realizadas no Brasil e no Espírito Santo.

A irrigação é uma das opções importantes para a adaptação às mudanças climáticas, pois o tempo de irrigação, aliado à eficiência do uso da água nas lavouras, pode ser crucial para minimizar as perdas de rendimento (Iniesta *et al.*, 2009) e, portanto, o conhecimento da resposta da cultura ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas pode auxiliar na mitigação dos impactos.

Ainda, as técnicas de poda podem promover aumento da distribuição de luz dentro do dossel (orientada para a fotossíntese), aeração da folhagem e bom desenvolvimento de brotos (Michalopoulos *et al.*, 2020). Também, o uso da cobertura morta dos resíduos da poda, em vez da queima, potencializa a fertilidade do solo, aumentando a reciclagem de nutrientes, melhorando o carbono orgânico do solo (Montana *et al.*, 2018) e diminuindo as emissões diretas de CO<sub>2</sub> na atmosfera. No entanto, o uso do resíduo da poda para cobertura morta pode aumentar o risco de pragas e doenças, e deve ser usado com cuidado.

A captação de água pode ser feita via caixa seca, terraços, barragens, poços artesianos e uso de água subterrânea com responsabilidade. Para isso, estudos e ações estruturantes devem ser realizados de forma imediata. O aprofundamento do sistema radicular das plantas também é uma técnica simples que pode ser utilizada e fomentada, pois com a melhoria física e química do solo, as plantas poderão buscar água em maior profundidade.

Essas estratégias têm grandes potenciais de mitigação e adaptação. No entanto, elas dependem da adequação de uma tecnologia à região, da percepção das pessoas, da viabilidade econômica e da complexidade técnica. Além disso, essas estratégias funcionam bem quando várias intervenções são usadas em conjunto e em solidariedade umas com as outras.

## **Considerações finais**

Embora existam incertezas quanto ao cenário climático futuro e seus possíveis impactos, estudos relatam que as mudanças climáticas irão diminuir a produtividade agrícola nos próximos anos. Os principais fatores do clima, a saber, temperatura, precipitação e gases de efeito estufa, provocam incertezas quanto à fertilidade do solo, aos recursos de irrigação, à fisiologia e às atividades metabólicas das plantas.

Várias estratégias de mitigação e adaptação estão sendo desenvolvidas para compensar o impacto deletério das mudanças climáticas na sustentabilidade agrícola. Essas tecnologias incluem práticas

inteligentes de cultivo agroflorestal, aplicação precisa de nutrientes e água, desenvolvimento de variedades tolerantes ao estresse a redução de perdas e desperdícios de alimentos em toda a cadeia alimentar. Mais que isso, a promoção do aprofundamento do sistema radicular das plantas e melhorias na captação e no uso da água são práticas fundamentais, que podem ser fomentadas e utilizadas. Essas tecnologias reduzem significativamente os efeitos das mudanças climáticas nas lavouras e as tornam mais adequadas ao clima, minimizando os impactos desfavoráveis.

Espera-se que as estratégias de mitigação e adaptação aumentem a renda dos agricultores sem comprometer a sustentabilidade da produção agrícola. É necessário desenvolver variedades adequadas que possam se adaptar às variações climáticas, juntamente com o manejo agrônômico planejado e o controle de pragas nas culturas. Os agricultores precisam ser informados de forma eficiente sobre as várias tecnologias climáticas inteligentes e receber orientações e conhecimento para simplificar seu uso no campo. Em adição, é importante ressaltar que há necessidade de mais recursos para a execução de pesquisas científicas e formação de recursos humanos para desenvolver tais trabalhos e melhorar a performance e a eficiência.

## Referências

ABDELHAFEZ, Ahmed A.; METWALLEY, Shawky M.; ABBAS, Hassan H. Irrigation: Water resources, types and common problems. In: EGYPT OMRAN, El-Sayed; NEGM, Abdelazim (eds.). **Technological and Modern Irrigation Environment in Egypt, Springer Water**. Cham: Springer, 2020, p. 15-34.

AINSWORTH, Elizabeth A.; ROGERS, Alistair. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. **Plant Cell Environment**, v. 30, n.3, p. 258-270, 2007.

ARAÚJO, André Vasconcellos *et al.* Crescimento microclimático e vegetativo em consórcio de café e banana. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 214-222, 2015.

ARAUJO, André Vasconcellos *et al.* Microclima e desenvolvimento do café 'Conilon' consorciado com seringueira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 872-881, 2014.

ARAUJO, André Vasconcellos *et al.* Microclima, desenvolvimento e produtividade do café robusta sombreado por seringueiras e a pleno sol. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 700-709, 2016.

ASSAD, Eduardo Delgado *et al.* Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira as mudanças climaticas. *In*: BRASIL. **Modelagem climática e vulnerabilidades Setoriais a mudança do clima no Brasil**. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

ATLIN, Gary N.; CAIRNS, Jill E.; DAS, Biswanath. Rapid breeding and varietal replacement are critical to adaptation of cropping systems in the developing world to climate change. **Glob. Food Sec.**, v. 12, p. 31-37, 2017.

BACA, María *et al.* An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. **PLoS ONE**, v. 9, n. 2, p. e88463, 2014.

BARBOSA, Dimmy Herllen Silveira G. *et al.* Adaptability and stability of conilon coffee in areas of high altitude **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 3, p. 7879-7888, 2014.

BARNABY, Jinyoung Y. *et al.* Combined effects of CO<sub>2</sub> enrichment, diurnal light levels and water stress on foliar metabolites of potato plants grown in naturally sunlit controlled environment chambers. **Physiologia Plantarum**, v. 153, n. 2, p. 243-252, 2015.

BIS, Ana Paula Pereira *et al.* Microclimatic characterization of a conilon coffee plantation grown in an east-west orientation. **Aust. J. Crop. Sci.**, v. 14, p. 431-438, 2020.

BIS, Ana Paula Pereira *et al.* Microclimatic characterization of conilon coffee cultivated in north-south alignment in northern Espírito Santo State, Brazil. **Coffee Science**, v. 14, p. 327-337, 2019.

BOUDJADJA, Aziz; MESSAHEL, Mekki; PAUC, Henri. Ressources hydriques en Algérie du Nord. **Rev. Sci. Eau. Journal Water Sci.**, v. 16, p. 285-304, 2003.

BRUCE, James P. *et al.* Carbon sequestration in soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 5, p. 382-389, 1999.

CAMARGO, Ângelo Paes de; CAMARGO, Marcelo Bento Paes de. Definition and outline for the phenological phases of arabic coffee under brazilian tropical conditions. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMARGO, Marcelo Bento Paes de. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010.

CIÊNCIA E CLIMA. **Aquecimento global, efeito estufa e mudanças climáticas explicados por artigos e recursos visuais**. Direto da ciência. 2018. Disponível em: <https://bit.ly/41W0cBO>. Acesso em: 18 maio 2020.

CONAB. Companhia Nacional do Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira**. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3FJValW>. Acesso em: 25 mar. 2021.

COOK, Benjamin I. *et al.* Global warming and 21st century drying. **Clim. Dyn.**, v. 43, p. 2607-2627, 2014.

COSTA, Luiz Claudio *et al.* Potential forcing of CO<sub>2</sub>, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 4, n. 1, 2009.

COVRE, André Monzoli *et al.* Vegetative growth of Conilon coffee plants under two water conditions in the Atlantic region of Bahia State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy** (On-line), v. 38, n. 4, p. 535-545, 2016.

CUSTÓDIO, Anselmo Augusto de Paiva *et al.* Florescimento de cafeeiros sob manejos de irrigação faces de exposição solar e posições na planta. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 245-257, 2014.

D'AMÉLIO, Monica Tais Siqueira. **Estudo de gases de efeito estufa na Amazônia**. 2006. 178f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

DaMATTA, Fábio M. *et al.* Conilon coffee in agroforestry systems. **Conilon Coffee**, Incaper, Vitória, v. 53, p. 593-609, 2017.

DaMATTA, Fábio M. *et al.* Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. **Food Research International**, v. 43, p. 1814-1823, 2010.

DaMATTA, Fábio M; RAMALHO, José D. Cochicho. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.

DEUNER, Sidnei *et al.* Stomatal behavior and components of the anti-oxidative system in coffee plants under water stress. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 1, p. 77-85, 2011.

DJANAGUIRAMAN, Maduraimuthu; VARA PRASAD, Pagadala Venkata. Ethylene production under high temperature stress causes premature leaf senescence in soybean. **Functional Plant Biology**, v. 37, n. 11, p. 1071-1084, 2010.

DUAN, Honglang *et al.* Carbon dynamics of eucalypt seedlings exposed to progressive drought in elevated [CO<sub>2</sub>] and elevated temperature. **Tree Physiology**, v. 33, n. 8, p. 779-792, 2013.

DUBBERSTEIN, Danielly *et al.* Mitigation of the Negative Impact of Warming on the Coffee Crop: The Role of Increased Air [CO<sub>2</sub>] and Management Strategies. *In*: SRINIVASARAO, Ch.; DUBBERSTEIN, Danielly *et al.* Resilient and Sensitive Key Points of the Photosynthetic Machinery of Coffea spp. to the Single and Superimposed Exposure to Severe Drought and Heat Stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-22, 2020.

EMBRAPA. **Pesquisadores avaliam vulnerabilidade do sistema alimentar frente às mudanças climáticas**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3FL4gz8>. Acesso em: 18 maio 2020.

EMBRAPA/CNPTIA. **Aquecimento global e agricultura tropical: Vulnerabilidades, Desafio, Oportunidades, Inovacao**, 2015.

EVANGELISTA, Cristiano Ramos *et al.* Atributos microbiológicos do solo na cultura da cana-de-açúcar sob manejo orgânico e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1549-1562, 2013.

FAO. Food and Agriculture Organization. **Perspectivas Agrícolas 2019-2028**. Enfoque especial América latina. Roma FAO-UN, 2019.

FIOCRUZ. **Ferramenta mapeia mudanças no clima do Espírito Santo**. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3sWuNBK>. Acesso em: 18 maio 2020.

FIOCRUZ. **Software identifica municípios capixabas mais vulneráveis à mudança do clima**. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3E1srYL>. Acesso em: 18 maio 2020.

FORTUNATO, Ana *et al.* Biochemical and molecular characterization of the antioxidative system of *Coffea* sp. under cold conditions in genotypes with contrasting tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, n. 5, p. 333-342, 2010.

GOMES, Lucas de Carvalho. *et al.* Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on Coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 294, n. 1, p. 1-11, 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agro 2017**. Disponível em: <https://bit.ly/3MB4E6b>. Acesso em: 11 mar. 2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3ftOI8d>. Acesso em: 11 mar. 2020.

IJSN. Instituto Jones dos Santos Neves. **Indicador do PIB do agronegócio do Estado do Espírito Santo**. Vitória, 2011. Disponível em: <https://bit.ly/3sXe4OD>. Acesso em: 11 mar. 2020.

INIESTA, Fernando *et al.* The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. **Eur. J. Agron.**, v. 30, n. 4, p. 258-265, 2009.

IOC. International Coffee Organization. **Processamento no campo**. London, 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3Uo11Aq>. Acesso em: 02 mar. 2021.

IPCC. **Aquecimento Global de 1,5°C**. Sumário para Formuladores de Políticas. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Versão em português, Publicada pelo MCTI; Brasil, 2018.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

IPCC/SEEG. Adaptado por: Grupo Consultivo de Especialistas. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/3DySifz>. Acesso em: 12 maio 2020.

JARVIS, Andy *et al.* **Climate change and its effect on conservation and use of plant genetic resources for food and agriculture and asso-**

- ciated biodiversity for food security.** 2009. Disponível em: <https://bit.ly/3NxAC24>. Acesso em: 20 fev. 2023
- KAMENYA, Sandra Ndagire *et al.* Genetics and breeding for climate change in Orphan crops. **Theor. Appl. Genet.**, v. 134, p. 1787-1815, 2021.
- LAL, Rattan. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, v. 304, n. 5677, p. 1623-1626, 2004.
- MARKELZ, R. J. Cody; STRELLNER, Reid S.; LEAKEY, Andrew D. B. Impairment of C<sub>4</sub> photosynthesis by drought is exacerbated by limiting nitrogen and ameliorated by elevated [CO<sub>2</sub>] in maize. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 9, p. 3235-3246, 2011.
- MARTINS, Madlles Q. *et al.* Genetic variability on nutrient contents in Coffea canephora genotypes Cultivated at 850 meters of altitude in two crop seasons. **Functional Plant Breeding Journal**, v. 1, p. 59-71, 2019.
- MARTINS, Madlles Q. *et al.* Protective response mechanisms to heat stress in interaction with high [CO<sub>2</sub>] conditions in Coffea spp. **Front. Plant Sci.**, v. 7, p. 1-18, 2016.
- MARTINS, Madlles Q. *et al.* Vegetative growth of 28 genotypes of Coffea canephora at 850 meters of altitude. **Aust. J. Crop. Sci.**, v. 14, p. 1616-1622, 2020.
- MEHRAZAR, Aida *et al.* Adaptation of water resources system to water scarcity and climate change in the Suburb Area of Megacities. **Water Resour. Manage.**, v. 34, n. 3, p. 3855-3877, 2020.
- MICHALOPOULOS, George *et al.* Adaptation of Mediterranean Olive Groves to Climate Change through Sustainable Cultivation Practices. **Climate**, v. 8, n. 54, 2020.
- MONTANARO, Giuseppe *et al.* Climate change mitigation and adaptation in agriculture: The case of the olive. **J. Water Clim. Chang.**, v. 9, n. 4, p. 633-642, 2018.
- NASSOPOULOS, Hypatie. **Les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux en Méditerranée.** 2012. 173f. Tese (Doutorado em Economia e Finanças) – Université Paris-Est, Paris. Disponível em: <https://bit.ly/3sVEznM>. Acesso em: 10 jan. 2023
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Documento de análise** [recurso eletrônico]: evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-

2013): setor agropecuário / Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (IMAFLORA). São Paulo: Observatório do Clima, 2015.

OLIOSI, Gleison *et al.* Microclimate and development of *Coffea canephora* cv. Conilon under different shading levels promoted by Australian cedar (*Toona ciliata* M. Roem. var. *Australis*). **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 528-538, 2016.

OLIVEIRA, Marcos Góes *et al.* Physiological responses of photosynthesis in black pepper plants under different shade levels promoted by intercropping with rubber trees. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 5, p. 513-526, 2018.

OLIVEIRA, Vanessa. F. *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and water deficit on fructan metabolism in *Viguiera discolor* Baker. **Plant Biology**, v. 15, n. 3, p. 471-82, 2013.

OVALLE-RIVERA, Oriana *et al.* Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PLoS One**, v. 10, n. 4, p. e0124155, 2015.

PARTELLI, Fábio Luiz *et al.* Andina - First Conilon Clonal Variety for High-Altitude Production. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 4, p. 476-480, 2019.

PARTELLI, Fábio Luiz *et al.* Chemical and Microbiological Soil Characteristics under Conventional and Organic Coffee Production Systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, p. 847-864, 2012.

PARTELLI, Fábio Luiz *et al.* Microclimate and development of 'Conilon' coffee intercropped with rubber trees. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, v. 49, n. 11, p. 872-881, 2014.

PARTELLI, Fábio Luiz *et al.* Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural** (UFSC. Impresso), v. 39, p. 2065-2072, 2009.

PÉREZ-LÓPEZ, Usue *et al.* Elevated CO<sub>2</sub> reduces stomatal and metabolic limitations on photosynthesis caused by salinity in *Hordeum vulgare*. **Photosynthesis Research**, v. 111, n. 3, 269-283, 2012.

PEZZOPANE, José Ricardo Macedo *et al.* Exigência térmica do café Arábica cultivar Mundo Novo no subperíodo florescimento-colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1781-1786, 2008.

PEZZOPANE, José Ricardo Macedo *et al.* Zoneamento de risco climático para a cultura do café Conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 3, p. 341-348, 2010.

PINHEIRO, Hugo A. *et al.* Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of Botany**, v. 96, n. 1, p. 101-108, 2005.

PRASAD, Pagadala Venkata Vara; ALLEN JR., Leon Hartwell; BOOTE, Kenneth J. Crop responses to elevated carbon dioxide and interaction with temperature. **Journal of Crop Improvement**, v. 13, n. 1-2, p. 113-155, 2005.

RAMALHO, José C. *et al.* Sustained photosynthetic performance of *Coffea* spp. under long-term enhanced [CO<sub>2</sub>]. **PLoS ONE**, v. 8, n. 12, p. e82712, 2013.

### Referências das figuras

RODRIGUES, Weverton P. *et al.* Long-term elevated air [CO<sub>2</sub>] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in Tropical *Coffea arabica* and *C. canephora* species. **Glob. Change Biol. Bioenergy**, v. 22, n. 1, p. 415-431, 2016.

RODRÍGUEZ, Juan Pablo *et al.* Healthy and resilient cereals and pseudo-cereals for marginal agriculture: molecular advances for improving nutrient bioavailability. **Front. Genet.**, v. 11, p. 49, 2020.

SANTOS, Catia A. Filipe *et al.* Perspectives on the potential impacts of climate changes on coffee plant and bean quality. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 27, n. 2, p. 152-163, 2015.

SARMIENTO-SOLER, Alejandra *et al.* Water use of *Coffea arabica* in open versus shaded systems under smallholder's farm conditions in Eastern Uganda. **Agric. For. Meteorol.**, v. 266, n. 266-267, p. 231-242, 2019.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3UIZ9cA>. Acesso em: 18 maio 2020.

SEEG; Revista Galileu 2018. Disponível em: <http://glo.bo/3DCgQhp>. Acesso em: 18 maio 2020.

SEMEDO, José Nobre *et al.* Coffee responses to drought, warming and high [CO<sub>2</sub>] in a context of future climate change scenarios. In: ALVES, Fátima; LEAL FILHO, Walter; AZEITEIRO, Ulisses (eds.). **Climate Change Management**. Springer, 2018, p. 465-477.

SHANKER, Arun; SHANKER, Chitra (orgs.). **Climate Resilient Agriculture - Strategies and Perspectives**. 3. ed. InTech, 2018, p. 57-85.

SHORTRIDGE, Julie. Observed trends in daily rainfall variability result in more severe climate change impacts to agriculture. **Clim. Chang.**, v. 157, n. 3, p. 429-444, 2019.

SILVA, Larícia Olária Emerick *et al.* Root Trait Variability in Coffea canephora Genotypes and Its Relation to Plant Height and Crop Yield. **Agronomy-Basel**, v. 10, n. 9, p. 1394, 2020.

STEYL, Gideon; DENNIS, Ingrid. Review of coastal-area aquifers in Africa. **Hydrogeol. J.**, v. 18, p. 217-225, 2010.

VALENTINI, Luis Sérgio de Paiva *et al.* Temperatura do ar em sistemas de produção de café arábica em monocultivo e arborizados com seringueira e coqueiro-anão na região de Mococa, SP. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 1005-1010, 2010.

VALIZADEH, Naser; BIJANI, Masoud; ABBASI, Enayat. Farmers' active participation in water conservation: insights from a survey among farmers in Southern regions of West Azerbaijan Province, Iran. **J. Agric. Sci. Technol. (JAST)**, v. 20, n. 5, p. 895-910, 2018.

VENANCIO, Luan Peroni *et al.* Impact of drought associated with high temperatures on Coffea canephora plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 19719, 2020.

VENKATRAMANAN, Veluswamy ; SHAH, Shachi. Climate smart agriculture technologies for environmental management: the intersection of sustainability, resilience, wellbeing and development. *In*: SHAH, Shachi *et*

*al.* (eds.). **Sustainable green technologies for environmental management**. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019, p. 29-51.

VENKATRAMANAN, Veluswamy ; SHAH, Shachi; PRASAD, Ram (eds.). **Global climate change and environmental policy: agriculture perspectives**. Singapore: Springer Nature, 2020.

WALTER, Lidiane Cristine; ROSA, Hamilton Telles; STRECK, Nereu Augusto. Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudanças climáticas. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1237-1245, 2010. Disponível em: <https://bit.ly/3h0FZui>. Acesso em: 10 mar. 2023.

WERTIN, Timothy M.; McGUIRE, Mary Anne; TESKEY, Robert O. The influence of elevated temperature, elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and water stress on net photosynthesis of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) at northern, central and southern sites in its native range. **Global Change Biology**, v. 16, n. 7, p. 2089-2103, 2010.

XU, Zhenzhu; JIANG, Yanling; ZHOU, Guangsheng. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO<sub>2</sub> with environmental stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 701-717, 2015.

ZANON, Alencar Junior; STRECK, Nereu Augusto; GRASSINI, Patriocio. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447-1454, 2016.

ZHU, Chunwu *et al.* The temporal and species dynamics of photosynthetic acclimation in flag leaves of rice (*Oryza sativa*) and wheat (*Triticum aestivum*) under elevated carbon dioxide. **Physiologia Plantarum**, v. 145, n. 3, p. 395-405, 2012.

ZHU, Xiai *et al.* Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system? **Soil Tillage Res.**, v. 191, n. 1, p. 327-339, 2019.

ZULLO, Jurandir; PEREIRA, Vânia Rosa; KOGA-VICENTE, Andrea. Sugar-energy sector vulnerability under CMIP5 projections in the Brazilian central-southern macro-region. **Climatic Change**, v. 149, n. 3, p. 489-502, 2018.



## CAPÍTULO 6

# “UM ALERTA VERMELHO PARA A HUMANIDADE”: OS TRÊS RELATÓRIOS DE AVALIAÇÃO (AR6) DO IPCC DE 2021 E 2022

*Wagner Rodrigues Soares  
Wesley de Souza Campos Correa*

### **Introdução**

Neste capítulo, é feita uma revisão do estado da arte em relação às mudanças climáticas a partir das principais conclusões dos Resumos para Formuladores de Políticas (Summary for Policy Makers) contidos nos três recentes relatórios de avaliação do Internacional Panel on Climate Change - IPCC-AR6 (Sixth Assessment Report) (IPCC, 2021; 2022a; 2022b) lançados em 2021 e 2022: o relatório “Climate Change 2021: The Physical Science Basis” (IPCC, 2021), elaborado pelo Grupo de Trabalho I (WGI), publicado em agosto de 2021; o relatório “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability” (IPCC, 2022a), elaborado pelo Grupo de Trabalho II (WGII), publicado em fevereiro de 2022; e o relatório “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change” (IPCC, 2022b), elaborado pelo Grupo de Trabalho III (WGIII) do IPCC-AR6, lançado em abril de 2022. Eles enfatizam a emergência climática a partir da sentença “Um Alerta Vermelho para a Humanidade”.

O IPCC fornece avaliações regulares da base científica das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros, além de opções de adaptação e mitigação. Os relatórios abrangem uma ampla gama de disciplinas no cumprimento do mandato do IPCC, objetivando avaliar informações científicas, tecnológicas e socioeconômicas para fornecer aos formuladores de políticas uma visão clara do estado atual do conhecimento científico relevante às mudanças climáticas. Criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), o objetivo do IPCC é fornecer aos governos, em todos os níveis, informações

científicas que possam ser usadas para desenvolver políticas climáticas. Os relatórios do IPCC também são uma contribuição fundamental para as negociações internacionais sobre mudanças climáticas.

A contribuição do WGI para o Sexto Relatório de Avaliação aborda a compreensão física mais atualizada do sistema climático e das mudanças climáticas, reunindo os mais recentes avanços na ciência do clima. O WGII avalia os impactos das mudanças climáticas, analisando os ecossistemas, a biodiversidade e as comunidades humanas nos níveis global e regional. Também, são analisadas as vulnerabilidades, as capacidades, os limites do mundo natural e das sociedades humanas para adaptação às mudanças climáticas. O relatório do WGIII fornece uma avaliação global atualizada do progresso e das promessas de mitigação das mudanças climáticas e examina as fontes de emissões globais, explicando os desenvolvimentos nos esforços de redução e mitigação de emissões e avaliando o impacto dos compromissos climáticos nacionais em relação às metas de emissões de longo prazo.

O IPCC não realiza pesquisas próprias, não realiza simulações em modelos ou faz medições de clima ou fenômenos climáticos. Seu papel é avaliar a literatura científica, técnica e socioeconômica relevante para entender as mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros, bem como opções de adaptação e mitigação. As equipes de autores avaliam criticamente todas essas informações de qualquer fonte que deva ser incluída no relatório. Os autores fazem uma extensa revisão bibliográfica, acessando dezenas de milhares de publicações científicas que são referenciadas nos relatórios. O número de comentários de especialistas de diversas áreas do conhecimento no relatório do WGI é de 51.387, no WGII de 40.293 e no WGIII de 32.665, respectivamente. Os governos são convidados em diferentes etapas a comentar as avaliações científicas, técnicas e socioeconômicas e o equilíbrio geral dos projetos. Atualmente, 195 governos participaram do IPCC, entre eles, o Brasil.

## 1. Métrica utilizada nos relatórios de avaliação AR6 do IPCC

Nos relatórios AR6 do IPCC cada descoberta é fundamentada em uma avaliação de evidências e concordância subjacentes. Um **nível de confiança** é expresso usando cinco qualificadores: **muito bai-**

**xo, baixo, médio, alto e muito alto** e escrito em itálico, por exemplo, *média confiança*. Os termos a seguir foram usados para indicar a **probabilidade avaliada de um desfecho ou resultado: probabilidade virtualmente certa de 99-100%; muito provavelmente 90-100%; provável 66-100%; quase tão provável quanto não 33-66%; improvável 0-33%; muito improvável 0-10%; e excepcionalmente improvável 0-1%**. Termos adicionais (**extremamente provável 95-100%; mais provável do que não > 50-100%; e extremamente improvável 0-5%**) também são usados, quando apropriado.

## **2. Cenários SSPs (Shared Socio-economic Pathways): “Caminhos Socioeconômicos Compartilhados”**

Os novos cenários desenvolvidos no CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project – “Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados”) em sua fase 6 (Riahi *et al.*, 2017; O’Neil *et al.*, 2016; O’Neil *et al.*, 2017; WCRP, 2020) e utilizados no IPCC-AR6 (IPCC, 2021), são identificados como: SSPs (Shared Socio-economic Pathways), ou seja, “Caminhos Socioeconômicos Compartilhados”. São os cenários mais complexos criados até o momento e abrangem desde uma mitigação muito ambiciosa, até um crescimento contínuo das emissões. O cenário de mitigação mais ambicioso foi projetado especificamente para se alinhar com o limite inferior da meta de temperatura global do Acordo de Paris, isto é, de manter o aumento da temperatura global abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar o aumento a 1,5 °C. Os cinco SSPs foram criados, com suposições variadas sobre o desenvolvimento humano, incluindo: população, educação, urbanização, produto interno bruto (PIB), crescimento econômico, taxa de desenvolvimento tecnológico, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aerossóis, oferta e demanda de energia, mudanças do uso e cobertura da terra etc. Os SSPs foram projetados para funcionar em combinação com uma versão atualizada dos Representative Concentration Pathway (RCPs). Os novos RCPs definem as forças radiativas estabilizadas (a diferença entre a radiação solar recebida do Sol e a energia

de saída irradiada de volta para o espaço pela Terra) no final do século e, portanto, o nível de política de mudança do clima necessário para que um determinado SSP atinja esse forçamento. Os SSPs refletem a dificuldade e o sucesso associado, ou os desafios de implementar quaisquer políticas globais ou estratégias de mitigação ou adaptação frente às mudanças climáticas. Os SSPs são rotulados de SSP1 a SSP5. A Tabela 1 mostra uma visão geral de cada uma das cinco narrativas de cenários.

Cenários	Características
SSP1	<p><b>Sustentabilidade</b> - Tomando o caminho verde (baixos desafios para mitigação e adaptação)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O mundo muda gradualmente, mas de forma generalizada, em direção a um caminho mais sustentável, enfatizando o desenvolvimento mais inclusivo que respeita os limites ambientais percebidos;</li> <li>• A gestão dos bens comuns globais melhora lentamente os investimentos em educação e saúde, aceleram a transição demográfica e a ênfase no crescimento econômico, mudando para uma ênfase mais ampla do bem-estar humano;</li> <li>• Impulsionada por um compromisso cada vez maior de alcançar as metas de desenvolvimento, a desigualdade é reduzida tanto entre os países quanto dentro deles;</li> <li>• O consumo é orientado para o baixo crescimento material e para a menor intensidade de recursos e energia.</li> </ul>
SSP2	<p><b>Meio do caminho</b> - (desafios médios para mitigação e adaptação)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O mundo segue um caminho no qual as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não se afastam acentuadamente dos padrões históricos;</li> <li>• O desenvolvimento e o crescimento da renda prosseguem de forma desigual, com alguns países fazendo progressos relativamente bons, enquanto outros ficam aquém das expectativas;</li> <li>• Instituições globais e nacionais trabalham para alcançar as metas de desenvolvimento sustentável, mas fazem progressos lentos;</li> <li>• Os sistemas ambientais sofrem com a degradação, embora haja melhorias e, em geral, a intensidade do uso dos recursos e da energia diminui;</li> <li>• O crescimento da população global é moderado e estabiliza na segunda metade do século;</li> <li>• A desigualdade de renda persiste ou melhora apenas lentamente e os desafios para reduzir a vulnerabilidade às mudanças sociais e ambientais permanecem.</li> </ul>

Cenários	Características
SSP3	<p><b>Rivalidade regional</b> - Uma estrada rochosa (altos desafios para mitigação e adaptação)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O nacionalismo ressurgente, preocupações com competitividade e segurança e conflitos regionais levam os países a concentrarem cada vez mais em questões domésticas ou, no máximo, regionais;</li> <li>• As políticas mudam ao longo do tempo para tornarem-se cada vez mais orientadas para questões de segurança nacional e regional;</li> <li>• Os países concentram-se em alcançar metas de segurança energética e alimentar em suas próprias regiões em detrimento de um desenvolvimento mais amplo;</li> <li>• Os investimentos em educação e desenvolvimento tecnológico diminuem;</li> <li>• O desenvolvimento econômico é lento, o consumo é material-intensivo e as desigualdades persistem ou pioram ao longo do tempo;</li> <li>• O crescimento populacional é baixo nos países industrializados e alto nos países em desenvolvimento;</li> <li>• A baixa prioridade internacional para abordar as preocupações ambientais leva a uma forte degradação ambiental em algumas regiões.</li> </ul>
SSP4	<p><b>Desigualdade</b> - Um caminho dividido (baixos desafios para mitigação, altos desafios para adaptação)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investimentos altamente desiguais em capital humano, combinados com crescentes disparidades em oportunidades econômicas e poder político levam a crescentes desigualdades e estratificação tanto entre os países, quanto dentro deles;</li> <li>• Com o tempo, aumenta a lacuna entre uma sociedade internacionalmente conectada, que contribui para setores intensivos em conhecimento e capital da economia global, e uma coleção fragmentada de sociedades de baixa renda e baixa escolaridade que trabalham em uma economia de baixa tecnologia e mão de obra intensiva;</li> <li>• A coesão social degrada, o conflito e a agitação tornam-se cada vez mais comuns;</li> <li>• O desenvolvimento tecnológico é alto na economia e nos setores de alta tecnologia;</li> <li>• O setor de energia conectado globalmente se diversifica, com investimentos em combustíveis intensivos em carbono, como carvão e petróleo não convencional, mas também em fontes de energia de baixo carbono. As políticas ambientais se concentram em questões locais em torno de áreas de média e alta renda.</li> </ul>

Cenários	Características
SSP5	<p><b>Desenvolvimento movido a combustíveis fósseis</b> - Pegando a estrada (altos desafios para mitigação, baixos desafios para adaptação)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esse mundo coloca cada vez mais fé em mercados competitivos, inovação e sociedades participativas para produzir rápido progresso tecnológico e desenvolvimento do capital humano como o caminho para o desenvolvimento sustentável;</li> <li>• Os mercados globais estão cada vez mais integrados;</li> <li>• Há também fortes investimentos em saúde, educação e instituições para aumentar o capital humano e social;</li> <li>• Ao mesmo tempo, o impulso para o desenvolvimento econômico e social está associado à exploração de recursos abundantes de combustíveis fósseis e à adoção de estilos de vida intensivos em recursos e energia em todo o mundo;</li> <li>• Todos esses fatores levam ao rápido crescimento da economia global, enquanto a população global atinge picos e declínios no século XXI;</li> <li>• Problemas ambientais locais, como a poluição do ar, são gerenciados com sucesso;</li> <li>• Há fé na capacidade de gerir eficazmente os sistemas sociais e ecológicos, inclusive por geoenharia, se necessário.</li> </ul>

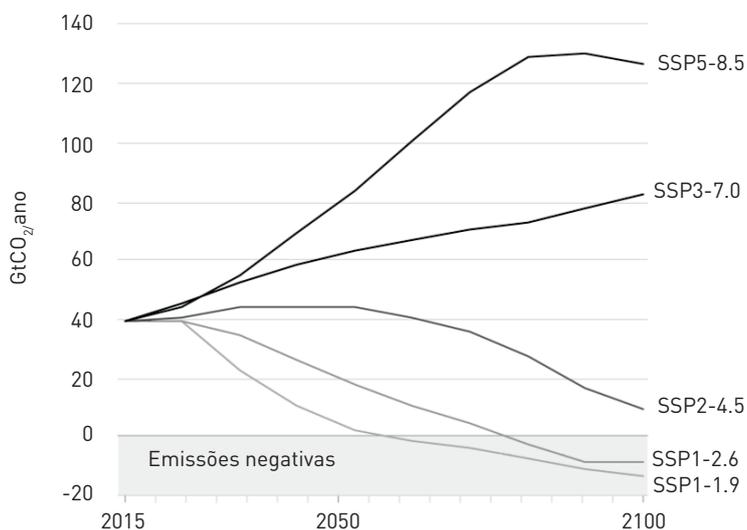
**Tabela 1. Características dos cenários SSPs**

Fonte: Riahi *et al.* (2017), O’Neil *et al.* (2016), O’Neil *et al.* (2017) e WCRP (2020).

Cada SSP gera uma projeção futura correspondente de emissões de gases de GEE e mudanças no uso e cobertura da terra sob o enredo básico do cenário. Os diferentes cenários de políticas levam a diferentes níveis de forçamento radiativo (uma medida da extensão em que os GEEs na atmosfera aquecem ou resfriam o clima, medido em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ) até o ano 2100 e variam de  $1.9 W/m^2$  (SSP1-1.9) a  $8.5 W/m^2$  (SSP5-8.5), como mostra a Figura 1 (IPCC, 2021). Valores mais altos de emissões representam aquecimento climático mais intenso.

O SSP1 e SSP5 projetam tendências relativamente otimistas para o desenvolvimento humano, com investimentos substanciais em educação e saúde, rápido crescimento econômico e instituições que funcionam bem. No entanto, o SSP5 pressupõe uma economia baseada em combustíveis fósseis e intensiva em

energia, enquanto no SSP1 há uma crescente mudança em direção a práticas sustentáveis. Os SSPs 3 e 4 projetam tendências de desenvolvimento mais pessimistas, com pouco investimento em educação ou saúde, população em rápido crescimento e desigualdades crescentes. No SSP3, os países priorizam a segurança regional, enquanto no SSP4 predominam grandes desigualdades dentro e entre países, nos dois casos, levando a sociedades altamente vulneráveis às mudanças climáticas. Já o SSP2 projeta um caminho central no qual as tendências continuam seus padrões históricos sem desvios substanciais.



**Figura 1. Emissões de CO<sub>2</sub> dos cinco principais cenários SSPs em GtCO<sub>2</sub>/ano**

Fonte: Adaptada de IPCC (2021).

As informações sobre as mudanças na temperatura da superfície global e outros impactos dos SSPs serão mostrados ao longo deste capítulo.

### 3. Relatório de avaliação “Climate Change 2021: The Physical Science Basis” (Mudança Climática 2021: A Base Física da Ciência)

Este relatório avalia a base física das mudanças climáticas do passado, do presente e do futuro. Ele examina como as emissões antrópicas estão levando a mudanças no sistema terrestre, e mostra como essas mudanças nos levaram a já sofrer os impactos climáticos no nível atual de aquecimento, bem como, mapear por meio de cenários climáticos como esses impactos podem aumentar se as emissões e temperaturas continuarem a aumentar sem controle.

#### *O Estado Atual do Clima*

- É *inequívoco* que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra. Ocorreram mudanças amplas e rápidas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera. Os aumentos observados nas concentrações dos gases de efeito estufa (GEE), desde cerca de 1750, são, inequivocamente, causados por atividades humanas. Desde 2011, as concentrações continuaram a aumentar na atmosfera, atingindo médias anuais de 410 ppm para o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1866 ppb para o metano (CH<sub>4</sub>) e 332 ppb para o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) em 2019. A terra e o oceano absorveram uma proporção quase constante (globalmente cerca de 56% ao ano) das emissões de CO<sub>2</sub> das atividades humanas nas últimas seis décadas, com diferenças regionais (*alta confiança*);
- O intervalo *provável* do aumento total da temperatura da superfície global causado pelo homem de 1850-1900 a 2010-2019 é de 0,8 °C a 1,3 °C, com uma melhor estimativa de 1,07 °C. É *provável* que GEEs tenham contribuído com um aquecimento de 1,0 °C a 2,0 °C, outros *drivers* humanos (principalmente aerossóis) contribuíram com um resfriamento de 0,0 °C a 0,8 °C, *drivers* naturais mudaram a temperatura da superfície global em -0,1 °C para 0,1 °C,

- e a variabilidade interna alterou-a de  $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . É  *muito provável*  que GEEs tenham sido o principal fator do aquecimento troposférico desde 1979, e é  *extremamente provável*  que a destruição do ozônio estratosférico causada pelo homem tenha sido o principal fator de resfriamento da baixa estratosfera entre 1979 e meados da década de 1990;
- É  *praticamente certo*  que o oceano superior global (0-700 m de profundidade) aqueceu desde a década de 1970 e é  *extremamente provável*  que a influência humana seja o principal fator. É  *praticamente certo*  que as emissões de  $\text{CO}_2$  causadas pelo homem são o principal  *drive*  da atual acidificação global da superfície do oceano. Existe uma  *grande confiança*  de que os níveis de oxigênio caíram em muitas regiões oceânicas superiores. A precipitação média global sobre a terra provavelmente aumentou desde 1950, com uma taxa de aumento mais rápida desde a década de 1980 ( *média confiança* ). É  *provável*  que a influência humana tenha contribuído para o padrão de mudanças observadas na precipitação desde meados do século XX, e é  *extremamente provável*  que a influência humana tenha contribuído para o padrão de mudanças observadas na salinidade do oceano próximo à superfície. As trilhas das tempestades de latitude média provavelmente mudaram para os polos em ambos os hemisférios desde a década de 1980, com marcada sazonalidade nas tendências ( *média confiança* ). Para o Hemisfério Sul, a influência humana  *muito provavelmente*  contribuiu para a mudança para os polos do jato extratropical intimamente relacionado no verão austral;
  - É  *praticamente certo*  que extremos de calor (incluindo ondas de calor) se tornaram mais frequentes e mais intensos na maioria das regiões terrestres desde a década de 1950, enquanto extremos de frio (incluindo ondas de frio) tornaram-se menos frequentes e menos severos, com  *alta confiança*  de que a mudança no clima induzido pelo homem é o

principal drive dessas mudanças. Alguns extremos de calor recentes observados na última década teriam sido *extremamente improváveis* de ocorrer sem a influência humana no sistema climático. As ondas de calor marinhas praticamente dobraram em frequência desde a década de 1980 (*alta confiança*), e a influência humana muito provavelmente contribuiu para a maioria delas desde pelo menos 2006;

- A frequência e a intensidade de eventos de precipitação intensa aumentaram desde a década de 1950 na maioria das áreas terrestres para as quais os dados observacionais são suficientes para a análise de tendências (*alta confiança*), e a mudança climática induzida pelo homem é *provavelmente* o principal fator. A mudança climática induzida pelo homem contribuiu para o aumento das secas agrícolas e ecológicas em algumas regiões devido ao aumento da evapotranspiração na Terra (*média confiança*);
- A influência humana *provavelmente* aumentou a chance de eventos extremos compostos desde a década de 1950. Isso inclui aumentos na frequência de ondas de calor e secas simultâneas em escala global (*alta confiança*); clima favorável ao fogo em algumas regiões de todos os continentes habitados (*média confiança*); e alagamentos compostos em alguns locais (*média confiança*).

### ***Futuros Climáticos Possíveis***

- Em comparação com 1850-1900, a temperatura média da superfície global entre 2081-2100 provavelmente será maior em 1,0 °C a 1,8 °C sob o cenário de emissões muito baixas de GEE considerado (SSP1-1.9); em 2,1 °C a 3,5 °C no cenário intermediário de emissões de GEE (SSP2-4.5); e de 3,3 °C a 5,7 °C no cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8.5). A última vez que a temperatura da superfície global foi mantida em 2,5 °C ou acima foi há mais de 3 milhões de anos (*média confiança*);

- Com base na avaliação de várias linhas de evidência, o aquecimento global de 2 °C, relativo a 1850-1900, seria excedido durante o século XXI sob os cenários de emissões de GEE altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5- 8.5, respectivamente). O aquecimento global de 2 °C seria *extremamente provavelmente* excedido no cenário intermediário de emissões de GEE (SSP2-4.5). Sob os cenários de emissões de GEE muito baixas e baixas, é *extremamente improvável* que o aquecimento global de 2 °C seja excedido (SSP1-1.9), ou *improvável* de ser excedido (SSP1-2.6). Cruzando o nível de aquecimento global de 2 °C no médio prazo (2041-2060), é *muito provável* de ocorrer no cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8.5), *provável* de ocorrer no cenário de emissões de GEE altas (SSP3-7.0), e *mais provável* do que não ocorrer no cenário intermediário de GEE cenário de emissões (SSP2-4.5);
- O aquecimento global de 1,5 °C em relação a 1850-1900 seria excedido durante o século XXI sob os cenários de emissões de GEE intermediários, altos e muito altos (SSP2-4.5, SSP3 7.0 e SSP5-8.5, respectivamente). Sob os cinco cenários ilustrativos, no curto prazo (2021-2040) o nível de aquecimento global de 1,5 °C *provavelmente* será excedido no cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8.5); *provavelmente* superado nos níveis intermediário e cenários de altas emissões de GEE (SSP2-4.5 e SSP3-7.0); *mais provável* que não seja excedido sob o cenário de baixas emissões de GEE (SSP1-2.6); e *mais provável* que não seja alcançado sob o cenário muito baixo de emissões de GEE (SSP1- 1.9). Além disso, para o cenário de emissões de GEE muito baixas (SSP1-1.9), é *mais provável* que a temperatura da superfície global volte a cair abaixo de 1,5 °C no final do século XXI, com uma ultrapassagem temporária de não mais que 0,1 °C acima de 1,5 °C aquecimento global;
- Com cada incremento adicional do aquecimento global, as mudanças nos extremos tornam-se maiores. Por exemplo,

cada 0,5 °C adicional de aquecimento global causa aumentos discerníveis na intensidade e frequência de extremos quentes, incluindo ondas de calor (*muito prováveis*) e fortes precipitações (*alta confiança*), bem como secas agrícolas e ecológicas em algumas regiões (*alta confiança*). Mudanças perceptíveis na intensidade e na frequência das secas meteorológicas, com mais locais mostrando aumentos do que diminuições, são observadas em algumas regiões com 0,5 °C adicional de aquecimento global (*média confiança*). Os aumentos na frequência e intensidade das secas hidrológicas tornam-se maiores com o aumento do aquecimento global em algumas regiões (*média confiança*). Haverá uma ocorrência crescente de alguns eventos extremos sem precedentes no registro observacional com aquecimento global adicional, mesmo a 1,5 °C de aquecimento global. As alterações percentuais projetadas na frequência são maiores para eventos mais raros (*alta confiança*);

- Algumas regiões de latitudes médias e semiáridas e a região de monções da América do Sul são projetadas para ver o maior aumento na temperatura nos dias mais quentes, cerca de 1,5 a 2 vezes a taxa de aquecimento global (*alta confiança*). O Ártico deverá experimentar maior aumento na temperatura nos dias mais frios, cerca de três vezes a taxa de aquecimento global (*alta confiança*). Com o aquecimento global adicional, a frequência das ondas de calor marinhas continuará a aumentar (*alta confiança*), particularmente no oceano tropical e no Ártico (*média confiança*);
- É *muito provável* que eventos de precipitação intensa se intensifiquem e se tornem mais frequentes na maioria das regiões com aquecimento global adicional. Na escala global, prevê-se que os eventos diários de precipitação extrema se intensifiquem em cerca de 7% para cada 1 °C de aquecimento global (*alta confiança*). A proporção de ciclones tropicais intensos (Categoria 4-5) e as velocidades de vento de pico dos ciclones

tropicais mais intensos devem aumentar em escala global com o aumento do aquecimento global (*alta confiança*);

- Prevê-se que o aquecimento adicional amplifique ainda mais o degelo do permafrost e a perda da cobertura de neve sazonal, do gelo terrestre e do gelo marinho do Ártico (*alta confiança*). O Ártico provavelmente estará praticamente livre de gelo marinho em setembro pelo menos uma vez antes de 2050 sob os cinco cenários ilustrativos considerados neste relatório, com ocorrências mais frequentes para níveis de aquecimento mais altos. Há *baixa confiança* na diminuição projetada do gelo marinho da Antártida;
- É *muito provável* que a variabilidade pluviométrica relacionada ao El Niño-Oscilação Sul seja ampliada até a segunda metade do século XXI nos cenários SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5;
- Prevê-se que a precipitação das monções aumente em médio e longo prazo na escala global, particularmente no Sul e Sudeste Asiático, Ásia Oriental e África Ocidental, exceto no extremo Oeste do Sahel (*alta confiança*). Prevê-se que a estação das monções tenha um início tardio na América do Norte e do Sul e África Ocidental (*alta confiança*) e um recuo tardio na África Ocidental (*média confiança*);
- Uma mudança projetada para o sul do globo é a intensificação das trilhas de tempestade de latitude média no verão do Hemisfério Sul, e a precipitação associada é *provável* ao longo prazo sob cenários de altas emissões de GEE (SSP3-7.0, SSP5-8.5), mas, no curto prazo, o efeito da recuperação do ozônio estratosférico neutraliza essas mudanças (*alta confiança*). Há uma *média confiança* em uma mudança contínua de tempestades em direção aos polos e sua precipitação no Pacífico Norte, enquanto há uma *baixa confiança* nas mudanças projetadas nas trilhas de tempestades do Atlântico Norte.
- Embora se projete que os sumidouros de carbono naturais da terra e do oceano absorvam, em termos absolutos, uma

quantidade progressivamente maior de CO<sub>2</sub> em cenários de emissões de CO<sub>2</sub> mais altos em comparação com os mais baixos, eles se tornam menos eficazes, ou seja, a proporção de emissões absorvidas por terra e oceano diminuirá com o aumento das emissões cumulativas de CO<sub>2</sub>. Isso é projetado para resultar em uma proporção maior de CO<sub>2</sub> emitido remanescente na atmosfera (*alta confiança*);

- Com base nas projeções de modelos, sob o cenário intermediário de emissões de GEE que estabiliza as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> neste século (SSP2-4.5), as taxas de CO<sub>2</sub> absorvidas pela terra e pelo oceano devem diminuir na segunda metade do século XXI (*alta confiança*). Sob os cenários de emissões de GEE muito baixas e baixas (SSP1-1.9, SSP1-2.6), nos quais as concentrações de CO<sub>2</sub> atingem o pico e declinam durante o século XXI, a terra e o oceano começam a absorver menos carbono em resposta ao declínio das concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> (*alta confiança*) e se tornar uma fonte líquida fraca em 2100 sob o SSP1-1.9 (*média confiança*). É *muito improvável* que o sumidouro global combinado, terra e oceano, se torne uma fonte até 2100 em cenários sem emissões líquidas negativas (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5);
- A magnitude dos *feedbacks* entre as mudanças climáticas e o ciclo do carbono torna-se maior, mas também mais incerta em cenários de altas emissões de CO<sub>2</sub> (*confiança muito alta*). No entanto, as projeções do modelo climático mostram que as incertezas nas concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> até 2100 são dominadas pelas diferenças entre os cenários de emissões (*alta confiança*). Respostas adicionais do ecossistema ao aquecimento que ainda não estão totalmente incluídas nos modelos climáticos, como fluxos de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> de zonas úmidas, degelo do permafrost e incêndios florestais, aumentariam ainda mais as concentrações desses gases na atmosfera (*alta confiança*);

- Com base em várias linhas de evidência, a estratificação oceânica superior (*praticamente certa*), a acidificação oceânica (*praticamente certa*) e a desoxigenação oceânica (*alta confiança*) continuarão a aumentar no século XXI a taxas dependentes de emissões futuras. As mudanças são irreversíveis em escalas de tempo centenárias a milenares na temperatura global do oceano (*confiança muito alta*), acidificação do oceano profundo (*confiança muito alta*) e desoxigenação (*média confiança*);
- É praticamente certo que o nível médio global do mar continuará a subir ao longo do século XXI. Em relação a 1995-2014, o *provável* aumento médio global do nível do mar até 2100 é de 0,28-0,55 m sob o cenário de emissões muito baixas de GEE (SSP1-1.9); 0,32-0,62 m sob o cenário de baixas emissões de GEE (SSP1-2.6); 0,44-0,76 m no cenário intermediário de emissões de GEE (SSP2-4.5); e 0,63-1,01 m sob o cenário de emissões de GEE muito altas (SSP5-8.5). Em 2150 é 0,37-0,86 m sob o cenário muito baixo (SSP1-1.9); 0,46-0,99 m no cenário baixo (SSP1-2.6); 0,66-1,33 m no cenário intermediário (SSP2-4.5); e 0,98-1,88 m sob o cenário muito alto (SSP5-8.5) (*média confiança*). O aumento médio global do nível do mar acima da faixa *provável* – aproximando-se de 2 m até 2100 e 5 m até 2150 sob um cenário de emissões muito altas de GEE (SSP5 -8.5) (*baixa confiança*) – não pode ser descartado, visto que há profunda incerteza nos processos de camada de gelo;
- Em longo prazo, o nível do mar está comprometido a subir por séculos a milênios devido ao contínuo aquecimento do oceano profundo e ao derretimento do manto de gelo, e permanecerá elevado por milhares de anos (*alta confiança*). Nos próximos 2.000 anos, o nível médio global do mar aumentará cerca de 2 a 3 m se o aquecimento for limitado a 1,5 °C, mas se elevará de 2 a 6 m se limitado a 2 °C, e de 19 a 22 m com 5 °C de aquecimento, continuando a aumentar nos

próximos milênios (*baixa confiança*). As projeções de aumento do nível médio global do mar multimilenar são consistentes com os níveis reconstruídos durante os períodos de clima quente anteriores: provavelmente 5 a 10 m mais alto do que hoje, cerca de 125.000 anos atrás, quando as temperaturas globais eram *muito provavelmente* 0,5 °C a 1,5 °C mais altas que 1850-1900; e *muito provavelmente* 5 a 25 m mais alto há cerca de 3 milhões de anos, quando as temperaturas globais eram 2,5 °C a 4 °C mais altas (*média confiança*).

### ***Informações Climáticas para Avaliação de Riscos e Adaptação Regional***

- O registro histórico da temperatura da superfície global destaca que a variabilidade decadal aumentou e mascarou as mudanças de longo prazo causadas pelo homem, e essa variabilidade continuará no futuro (*confiança muito alta*). Por exemplo, variabilidade decadal interna e variações nos fatores solares e vulcânicos mascararam parcialmente o aquecimento global da superfície humano causado durante 1998-2012, com assinaturas regionais e sazonais pronunciadas (*alta confiança*). No entanto, o aquecimento do sistema climático continuou durante esse período, refletido tanto no aquecimento contínuo do oceano global (*confiança muito alta*), quanto no aumento contínuo dos extremos quentes sobre a terra (*média confiança*);
- As mudanças projetadas causadas pelo homem no clima médio e os fatores de impacto climático (CIDs), incluindo extremos, serão amplificados ou atenuados pela variabilidade interna (*alta confiança*). O resfriamento de curto prazo, em qualquer local específico, com relação ao clima atual, pode ocorrer e seria consistente com o aumento da temperatura da superfície global devido à influência humana (*alta confiança*);
- A variabilidade interna tem sido amplamente responsável pela amplificação e atenuação das mudanças da precipita-

ção média decadal-multidecadal observadas e causadas pelo homem em muitas regiões terrestres (*alta confiança*). Em escalas globais e regionais, as mudanças de curto prazo nas monções serão dominadas pelos efeitos da variabilidade interna (*média confiança*). Além da influência da variabilidade interna, as mudanças projetadas de curto prazo na precipitação em escalas global e regional são incertas, devido à incerteza do modelo e a incerteza nos *drives* de aerossóis naturais e antropogênicos (*média confiança*);

- Todas as regiões são projetadas para experimentar novos aumentos nos fatores de impacto climáticos quentes (CIDs) e diminuições nos CIDs frios (*alta confiança*). Outras diminuições são projetadas no permafrost; neve, geleiras e mantos de gelo; e gelo do lago e do mar Ártico (*média confiança a alta*). Essas mudanças seriam maiores a 2 °C de aquecimento global ou acima do que a 1,5 °C (*alta confiança*). Por exemplo, os limites de calor extremo, relevantes para a agricultura e saúde, são projetados para serem excedidos com mais frequência em níveis mais altos de aquecimento global (*alta confiança*);
- Com um aquecimento global de 1,5 °C, prevê-se que chuvas fortes e inundações associadas se intensifiquem e sejam mais frequentes na maioria das regiões da África e Ásia (*alta confiança*), América do Norte (*média confiança a alta*) e Europa (*média confiança*). Além disso, secas agrícolas e ecológicas mais frequentes e/ou severas são projetadas em algumas regiões em todos os continentes habitados, exceto na Ásia, em comparação com 1850-1900 (*média confiança*). Aumentos nas secas meteorológicas também são projetados em algumas regiões (*média confiança*). Um pequeno número de regiões é projetado para experimentar aumentos ou diminuições na precipitação média (*média confiança*);
- No aquecimento global de 2 °C e acima, o nível de confiança e a magnitude da mudança nas secas e na precipitação intensa e média aumentam em comparação com aqueles a 1,5 °C. Prevê-se que a precipitação intensa e eventos de inun-

dação associados se tornem mais intensos e frequentes nas ilhas do Pacífico e em muitas regiões da América do Norte e Europa (*média confiança a alta*). Essas mudanças também são observadas em algumas regiões da Australásia e América Central e do Sul (*média confiança*). Várias regiões da África, América do Sul e Europa estão projetadas para experimentar um aumento na frequência e/ou gravidade das secas agrícolas e ecológicas com *média confiança a alta*; aumentos também são projetados na Australásia, América Central e do Norte e Caribe com *média confiança*. Um pequeno número de regiões na África, Australásia, Europa e América do Norte também são projetados para serem afetados por aumentos de secas hidrológicas, e várias regiões são projetadas para serem afetadas por aumentos ou diminuições de secas meteorológicas, com mais regiões apresentando um aumento (*média confiança*). Prevê-se que a precipitação média aumente em todas as regiões polares, norte da Europa e norte da América do Norte, a maioria das regiões asiáticas e duas regiões da América do Sul (*alta confiança*);

- Prevê-se que mais CIDs, em mais regiões, mudem a 2 °C ou mais em comparação com o aquecimento global de 1,5 °C (*alta confiança*). As mudanças específicas da região incluem intensificação de ciclones tropicais e/ou tempestades extratropicais (*média confiança*), aumento das inundações dos rios (*média confiança a alta*), reduções na precipitação média e aumento na aridez (*média confiança a alta*) e aumento no clima de incêndio (*média confiança a alta*). Há *baixa confiança* na maioria das regiões em possíveis mudanças futuras em outros CIDs, como granizo, tempestades de gelo, tempestades severas, tempestades de poeira, fortes nevascas e deslizamentos de terra;
- As cidades intensificam localmente o aquecimento induzido pelo homem, e uma maior urbanização, juntamente com extremos quentes mais frequentes, aumentará a gravi-

dade das ondas de calor (*confiança muito alta*). Nas cidades costeiras, a combinação de eventos extremos mais frequentes do nível do mar (devido à elevação do nível do mar e tempestades) e eventos extremos de chuvas/fluxos fluviais tornarão as inundações mais prováveis (*alta confiança*);

- Muitas regiões são projetadas para experimentar um aumento na probabilidade de eventos compostos com maior aquecimento global (*alta confiança*). Em particular, ondas de calor e secas simultâneas provavelmente se tornarão mais frequentes. Os extremos simultâneos em vários locais, inclusive em áreas de produção agrícola, tornam-se mais frequentes a 2 °C e acima em comparação com o aquecimento global de 1,5 °C (*alta confiança*);
- Se o aquecimento global aumentar, alguns eventos extremos compostos com baixa probabilidade no clima passado e atual se tornarão mais frequentes, e haverá uma maior probabilidade de ocorrência de eventos com maior intensidade, duração e/ou extensão espacial sem precedentes no registro observacional (*alta confiança*);
- É muito *provável* que a Circulação Meridional do Atlântico enfraqueça ao longo do século XXI para todos os cenários de emissões. Embora haja *alta confiança* no declínio do século XXI, há apenas *baixa confiança* na magnitude da tendência. Há uma *média confiança* de que não haverá um colapso abrupto antes de 2100. Se tal colapso ocorrer, muito provavelmente causaria mudanças abruptas nos padrões climáticos regionais e no ciclo da água, como um deslocamento para o sul no cinturão de chuva tropical, enfraquecimento das monções africanas e asiáticas, fortalecimento das monções do Hemisfério Sul, e seca na Europa.
- Limitando as Mudanças Climáticas Futuras
- O AR6 reafirma com *alta confiança* a constatação do AR5 de que existe uma relação quase linear entre as emissões an-

tropogênicas cumulativas de CO<sub>2</sub> e o aquecimento global que elas causam. Cada 1.000 GtCO<sub>2</sub> de emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> é avaliado para *provavelmente* causar um aumento de 0,27 °C a 0,63 °C na temperatura da superfície global com uma melhor estimativa de 0,45 °C. Essa é uma faixa mais estreita em comparação com o AR5 e SR1.5. Essa quantidade é chamada de resposta climática transitória às emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> (TCRE). Essa relação implica que atingir zero emissões líquidas de CO<sub>2</sub> antropogênico é um requisito para estabilizar o aumento da temperatura global induzido pelo homem em qualquer nível, mas que limitar o aumento da temperatura global a um nível específico implicaria limitar as emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> dentro de um orçamento de carbono;

- Durante o período de 1850 a 2019, foi emitido um total de 2390 ± 240 (*intervalo provável*) GtCO<sub>2</sub> antropogênico. Os orçamentos de carbono restantes foram estimados para vários limites de temperatura global e vários níveis de probabilidade, com base no valor estimado de TCRE e sua incerteza, estimativas de aquecimento histórico, variações no aquecimento projetado de emissões não CO<sub>2</sub>, *feedbacks* do sistema climático, degelo do permafrost e mudança da temperatura da superfície global após as emissões antropogênicas globais de CO<sub>2</sub> atingirem zero líquido;
- Vários fatores que determinam as estimativas do orçamento de carbono restante foram reavaliados e as atualizações desses fatores desde o SR1.5 são pequenas. Quando ajustadas para emissões, desde relatórios anteriores, as estimativas dos orçamentos de carbono restantes são, portanto, de magnitude semelhante em comparação com o SR1.5, mas maiores em comparação com AR5 devido a melhorias metodológicas;
- A remoção antropogênica de CO<sub>2</sub> (CDR) tem o potencial de remover CO<sub>2</sub> da atmosfera e armazená-lo de forma durável em reservatórios (*alta confiança*). O CDR visa compensar

as emissões residuais para atingir zero emissões líquidas de CO<sub>2</sub> ou zero emissões líquidas de GEE ou, se implementado em uma escala em que as remoções antrópicas excedam as emissões antrópicas, reduzindo a temperatura da superfície. Os métodos de CDR podem ter efeitos potencialmente amplos nos ciclos biogeoquímicos e no clima, que podem enfraquecer ou fortalecer o potencial desses métodos para remover CO<sub>2</sub> e reduzir o aquecimento, e também podem influenciar a disponibilidade e qualidade da água, produção de alimentos e biodiversidade (*alta confiança*);

- A remoção antropogênica de CO<sub>2</sub> (CDR), levando a emissões líquidas negativas globais, reduziria a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e reverteria a acidificação da superfície dos oceanos (*alta confiança*). As remoções e emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> são parcialmente compensadas pela liberação e absorção de CO<sub>2</sub>, respectivamente, de ou para reservatórios de carbono terrestres e oceânicos (*confiança muito alta*). O CDR reduziria o CO<sub>2</sub> atmosférico em uma quantidade aproximadamente igual ao aumento de uma emissão antropogênica da mesma magnitude (*alta confiança*);
- Se as emissões globais líquidas de CO<sub>2</sub> fossem alcançadas e sustentadas, o aumento global da temperatura da superfície induzido pelo CO<sub>2</sub> seria gradualmente revertido, mas outras mudanças climáticas continuariam em sua direção atual por décadas a milênios (*alta confiança*). Por exemplo, levaria de séculos a milênios para que o nível médio global do mar invertesse o curso, mesmo sob grandes emissões líquidas negativas de CO<sub>2</sub> (*alta confiança*);
- Nos cinco cenários ilustrativos, há mudanças simultâneas nas emissões de CH<sub>4</sub>, aerossol e precursor de ozônio, que também contribuem para a poluição do ar, levando a um aquecimento líquido da superfície global em curto e longo prazo (*alta confiança*). Em longo prazo, esse aquecimento líquido é menor em cenários que suponham controles de

poluição do ar combinados com reduções fortes e sustentadas de emissões de  $\text{CH}_4$  (*alta confiança*). Nos cenários de baixas e muito baixas emissões de GEE, as supostas reduções nas emissões de aerossóis antropogênicos levam a um aquecimento líquido, enquanto as reduções nas emissões de  $\text{CH}_4$  e outros precursores de ozônio levam a um resfriamento líquido. Devido à curta vida útil do  $\text{CH}_4$  e dos aerossóis, esses efeitos climáticos se contrabalançam parcialmente, e as reduções nas emissões de  $\text{CH}_4$  também contribuem para melhorar a qualidade do ar ao reduzir o ozônio da superfície global (*alta confiança*);

- Alcançar as emissões líquidas (globais) zero de  $\text{CO}_2$ , com emissões antropogênicas de  $\text{CO}_2$  equilibradas por remoções antropogênicas de  $\text{CO}_2$ , é um requisito para estabilizar (minimizar/reduzir) o aumento da temperatura da superfície global induzido pelo  $\text{CO}_2$ . Isso é diferente de atingir zero emissões líquidas de GEE, em que as emissões antropogênicas de GEE ponderadas por métricas equivalem a remoções antropogênicas de GEE ponderadas por métricas. Para um determinado caminho de emissões de GEE, os caminhos de GEEs individuais determinam a resposta climática resultante, enquanto a escolha da métrica de emissões usada para calcular as emissões e remoções agregadas de diferentes GEEs afeta em que momento os GEEs agregados são calculados como sendo zero líquido. As trajetórias de emissões que atingem e sustentam emissões líquidas zero de GEE definidas pelo potencial de aquecimento global de 100 anos são projetadas para resultar em um declínio na temperatura da superfície após um pico anterior (*alta confiança*);
- As reduções de emissões em 2020 associadas a medidas para reduzir a propagação da COVID-19 levaram a efeitos temporários, mas detectáveis, na poluição do ar (*alta confiança*) e a um aumento pequeno e temporário associado no forçamento radiativo total, principalmente devido a reduções

no resfriamento causadas por aerossóis decorrentes das atividades humanas (*média confiança*). As respostas climáticas globais e regionais a esse forçamento temporário são, no entanto, indetectáveis acima da variabilidade natural (*alta confiança*). As concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> continuaram a aumentar em 2020, sem diminuição detectável na taxa de crescimento de CO<sub>2</sub> observada (*média confiança*);

- As reduções nas emissões de GEE também levam a melhorias na qualidade do ar. No entanto, em curto prazo, mesmo em cenários com forte redução de GEEs, como nos cenários de baixas e muito baixas emissões de GEE (SSP1-2.6 e SSP1-1.9), essas melhorias não são suficientes em muitas regiões poluídas para atingir as diretrizes de qualidade do ar especificadas pela Organização Mundial da Saúde (*alta confiança*). Cenários com reduções direcionadas de emissões de poluentes atmosféricos levam a melhorias mais rápidas na qualidade do ar em poucos anos em comparação com reduções apenas nas emissões de GEE, mas, a partir de 2040, melhorias adicionais são projetadas em cenários que combinam esforços para reduzir poluentes atmosféricos e emissões de GEE, com a magnitude do benefício variando entre as regiões (*alta confiança*);
- Cenários com emissões de GEE muito baixas ou baixas (SSP1-1.9 e SSP1 2.6) teriam efeitos rápidos e sustentados para limitar as mudanças climáticas causadas pelo homem, em comparação com cenários com emissões de GEE altas ou muito altas (SSP3-7.0 ou SSP5-8.5), mas as respostas iniciais do sistema climático podem ser mascaradas pela variabilidade natural. Para a temperatura da superfície global, diferenças nas tendências de 20 anos provavelmente surgiriam em curto prazo sob um cenário de emissões de GEE muito baixo (SSP1-1.9), em relação a um cenário de emissões de GEE alto ou muito alto (SSP3-7.0 ou SSP5-8.5). A resposta de muitas outras variáveis climáticas surgiria da

variabilidade natural em diferentes momentos no final do século XXI (*alta confiança*);

- Cenários com emissões de GEE muito baixas e baixas (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) levariam a mudanças substancialmente menores em uma série de CIDs além de 2040 do que em cenários de emissões de GEE altas e muito altas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Até o final do século, cenários com emissões de GEE muito baixas e baixas limitariam fortemente a mudança de vários CIDs, como o aumento da frequência de eventos extremos de nível do mar, chuvas fortes e inundações pluviais e superação de limiares de calor perigoso. Ao mesmo tempo, limita o número de regiões onde ocorrem tais impactos em relação a cenários de emissões de GEE mais elevados (*alta confiança*). As mudanças também seriam menores em cenários de emissões muito baixas em comparação com baixas emissões de GEE, bem como para cenários intermediários (SSP2-4.5) em comparação com cenários de emissões de GEE altas ou muito altas (*alta confiança*).

#### **4. Relatório de avaliação “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability” (Mudanças Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade)**

O relatório “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability” (IPCC, 2022a) do WGII do IPCC-AR6, lançado em fevereiro de 2022, fornece uma avaliação detalhada dos impactos, riscos e adaptação das mudanças climáticas inclusive nas cidades, onde vive mais da metade da população mundial. As principais declarações desse relatório de avaliação em relação aos Impactos e Riscos observados e projetados são:

##### ***Impactos Observados das Mudanças Climáticas***

- Impactos generalizados em ecossistemas, pessoas, assentamentos e infraestrutura resultaram de aumentos obser-

vados na frequência e intensidade de extremos climáticos, incluindo extremos quentes na terra e no oceano, eventos de precipitação intensa, secas e clima de incêndio (*alta confiança*). Cada vez mais, desde o AR5, esses impactos têm sido atribuídos às mudanças climáticas induzidas pelo homem, particularmente por meio do aumento da frequência e gravidade de eventos extremos. Estes incluem o aumento da mortalidade humana relacionada ao calor (*média confiança*), o branqueamento e mortalidade de corais de água quente (*alta confiança*) e o aumento da mortalidade de árvores relacionada à seca (*alta confiança*). Os aumentos verificados em áreas queimadas por incêndios florestais foram atribuídos às mudanças climáticas induzidas pelo homem em algumas regiões (*média a alta confiança*). Os impactos adversos causados por ciclones tropicais, com perdas e danos relacionados, aumentaram devido à elevação do nível do mar e ao aumento da precipitação intensa (*média confiança*). Impactos nos sistemas naturais e humanos de processos de início lento, como acidificação dos oceanos, aumento do nível do mar ou diminuições regionais na precipitação também foram atribuídos às mudanças climáticas induzidas pelo homem (*alta confiança*);

- As mudanças climáticas causaram danos substanciais e perdas cada vez mais irreversíveis nos ecossistemas marinhos, terrestres, de água doce, costeiros e de oceano aberto (*alta confiança*). A extensão e a magnitude dos impactos das mudanças climáticas são maiores do que o estimado em avaliações anteriores (*alta confiança*). A deterioração generalizada da estrutura e da função do ecossistema, a resiliência e a capacidade de adaptação natural, bem como as mudanças no tempo sazonal, ocorreram devido às mudanças climáticas (*alta confiança*), com consequências socioeconômicas adversas (*alta confiança*). Aproximadamente metade das espécies avaliadas globalmente mudaram para os polos ou

para áreas com altitudes mais elevadas (*confiança muito alta*). Centenas de perdas locais de espécies foram causadas por aumentos na magnitude dos extremos de calor (*alta confiança*), bem como eventos de mortalidade em massa em terra e no oceano (*alta confiança*) e perda de florestas de algas (*alta confiança*). Algumas perdas já são irreversíveis, como as primeiras extinções de espécies impulsionadas pelas mudanças climáticas (*média confiança*). Outros impactos estão se aproximando da irreversibilidade, como os impactos das mudanças hidrológicas que são resultantes do recuo das geleiras, ou as mudanças em alguns ecossistemas de montanha (*média confiança*) e do Ártico impulsionados pelo degelo do permafrost (*alta confiança*);

- As mudanças climáticas, incluindo aumentos na frequência e na intensidade dos eventos extremos, reduziram a segurança alimentar e hídrica, dificultando os esforços para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (veja a anotação 1) (*alta confiança*). Embora a produtividade agrícola tenha aumentado, as mudanças climáticas desaceleraram esse crescimento globalmente nos últimos 50 anos (*média confiança*). Impactos negativos relacionados ocorreram principalmente em regiões de latitude média e baixa, mas impactos positivos ocorreram em algumas regiões de latitude alta (*alta confiança*). O aquecimento e a acidificação dos oceanos afetaram negativamente a produção de alimentos na aquicultura e na pesca de mariscos em algumas regiões oceânicas (*alta confiança*). O aumento dos eventos climáticos extremos expôs milhões de pessoas à insegurança alimentar aguda e reduziu a segurança hídrica, com os maiores impactos observados em muitos locais e/ou comunidades na África, Ásia, América Central e do Sul, Pequenas Ilhas e Ártico (*alta confiança*). Conjuntamente, perdas repentinas na produção de alimentos e acesso a alimentos, têm sido agravadas pela diminuição da diversidade da dieta, aumentando a desnutri-

ção em muitas comunidades (alta confiança), especialmente em Povos Indígenas, pequenos produtores de alimentos e famílias de baixa renda (*alta confiança*) com crianças, idosos e gestantes (*alta confiança*). Aproximadamente, metade da população mundial, atualmente, experimenta grave escassez de água por pelo menos uma parte do ano devido a fatores climáticos e não climáticos (*média confiança*);

***Anotação 1:*** *os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são um apelo global das Nações Unidas (ONU) à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade. São 17 objetivos ambiciosos e interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no mundo. “Ação contra a mudança global do clima” é o ODS 13.*

- Impactos econômicos adversos, atribuíveis às mudanças climáticas, incluindo os eventos climáticos extremos, têm sido cada vez mais identificados (*média confiança*). Alguns efeitos econômicos positivos foram identificados em regiões que se beneficiaram da menor demanda de energia, bem como vantagens comparativas nos mercados agrícolas e no turismo (*alta confiança*). Os danos econômicos das mudanças climáticas foram detectados em setores expostos ao clima, com efeitos regionais na agricultura, silvicultura, pesca, energia e turismo (*alta confiança*) e por meio da produtividade do trabalho ao ar livre (*alta confiança*). Alguns eventos climáticos extremos, como ciclones tropicais, reduziram o crescimento econômico no curto prazo (*alta confiança*). Fatores não climáticos, incluindo alguns padrões de assentamento e localização de infraestrutura, contribuíram para a exposição aos riscos climáticos extremos, aumentando a magnitude das perdas (*alta confiança*). Os meios de subsistência individuais foram afetados por mudanças na

produtividade agrícola, impactos na saúde humana e na segurança alimentar, destruição de casas e infraestrutura e perda de propriedade e renda, com efeitos adversos sobre gênero e equidade social (alta confiança).

### ***Vulnerabilidade e Exposição de Ecossistemas e Pessoas***

- A vulnerabilidade dos ecossistemas e das pessoas às mudanças climáticas difere substancialmente entre e dentro das regiões (*confiança muito alta*), impulsionada por padrões de interseção de desenvolvimento socioeconômico, uso insustentável do oceano e da terra, desigualdade, marginalização, padrões históricos e contínuos de desigualdade, como colonialismo e governança (*alta confiança*). Aproximadamente 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas vivem em contextos altamente vulneráveis às mudanças climáticas (*alta confiança*). Alta proporção de espécies são vulneráveis às mudanças climáticas (*alta confiança*). A vulnerabilidade humana e dos ecossistemas são interdependentes (*alta confiança*). Os atuais padrões de desenvolvimento, insustentáveis, estão aumentando a exposição de ecossistemas e pessoas aos riscos climáticos (*alta confiança*);
- O aquecimento global, atingindo 1,5 °C em curto prazo, causaria vários perigos climáticos e apresentaria vários riscos para os ecossistemas e os seres humanos (*confiança muito alta*). Ações de curto prazo que limitam o aquecimento global a cerca de 1,5 °C reduziram substancialmente as perdas e danos projetados e relacionados às mudanças climáticas em sistemas e ecossistemas humanos em comparação com níveis mais altos de aquecimento, mas não se pode eliminar a todos (*confiança muito alta*).
- Em curto prazo, os riscos associados ao clima para os sistemas naturais e humanos dependerão mais fortemente das mudanças em sua vulnerabilidade e exposição do que nas diferenças dos perigos climáticos entre os cenários de emissões (*alta confiança*). Existem diferenças regionais, e os riscos são maiores

onde espécies e pessoas existem perto de seus limites térmicos superiores, ao longo das costas, em estreita associação com gelo ou rios sazonais (*alta confiança*). Os riscos também são altos em lugares nos quais persistem vários fatores não climáticos ou onde a vulnerabilidade é elevada (*alta confiança*). Muitos desses riscos são inevitáveis no curto prazo, independentemente do cenário de emissão (*alta confiança*). Vários riscos podem ser moderados com adaptação (*alta confiança*);

- Os níveis de risco para todos os motivos de preocupação (RFC) são avaliados para se tornarem de altos a muito altos em níveis de aquecimento global que sejam mais baixos do que no AR5 (*alta confiança*). Entre 1,2 °C e 4,5 °C no nível de aquecimento global surgem riscos muito altos em todos os cinco RFCs em comparação com apenas dois RFCs no AR5 (*alta confiança*). Duas dessas transições de alto para muito alto risco estão associadas ao aquecimento de curto prazo: riscos para sistemas únicos e ameaçados em um valor médio de 1,5 °C [1,2 a 2,0] °C (*alta confiança*) e riscos associados a eventos climáticos extremos a um valor médio de 2 °C [1,8 a 2,5] °C (*média confiança*). Alguns dos principais riscos que contribuem para as RFCs são projetados para levar a impactos generalizados e potencialmente irreversíveis em níveis de aquecimento global de 1,5 a 2 °C se a exposição e a vulnerabilidade forem altas e a adaptação for baixa (*média confiança*). Ações de curto prazo que limitem o aquecimento global a cerca de 1,5 °C reduziriam substancialmente as perdas e danos projetados para sistemas e ecossistemas humanos quando tais prejuízos são comparados com aqueles causados pelos níveis mais altos de aquecimento, mas não podem eliminá-los todos (*confiança muito alta*).

### ***Riscos de Médio a Longo Prazo (2041–2100)***

- Além de 2040 e dependendo do nível de aquecimento global, as mudanças climáticas levarão inúmeros riscos

aos sistemas naturais e humanos (*alta confiança*). Para 127 riscos-chave identificados, os impactos avaliados de médio e longo prazo são até várias vezes maiores do que os observados atualmente (*alta confiança*). A magnitude, a taxa de mudança climática e os riscos associados dependem fortemente de ações de mitigação e adaptação de curto prazo, e os impactos adversos projetados e as perdas e danos relacionados aumentam a cada incremento do aquecimento global (*confiança muito alta*);

- A perda de biodiversidade, a degradação, os danos e a transformação dos ecossistemas já são os principais riscos para todas as regiões devido ao aquecimento global passado e continuarão a aumentar a cada incremento do aquecimento global (*confiança muito alta*). Nos ecossistemas terrestres, entre 3% a 14% das espécies avaliadas provavelmente enfrentarão um risco muito alto de extinção, em níveis de aquecimento global de 1,5 °C, aumentando entre 3% e 18% a 2 °C; entre 3% e 29% a 3 °C; entre 3% e 39% a 4 °C; e entre 3% e 48% a 5 °C. Nos ecossistemas oceânicos e costeiros, o risco de perda de biodiversidade varia entre moderado e muito alto em nível de aquecimento global de 1,5 °C, e é moderado a muito alto em 2°C, com mais ecossistemas em risco alto e muito alto (*alta confiança*). Mais que isso, tal risco aumenta para alto a muito alto na maioria dos ecossistemas oceânicos e costeiros em 3°C (*média confiança a alta*, dependendo do ecossistema). O risco de extinção muito alto para espécies endêmicas em *hotspots* de biodiversidade está projetado para pelo menos dobrar de 2% entre 1,5 °C e 2 °C os níveis de aquecimento global e aumentar pelo menos dez vezes se o aquecimento aumentar de 1,5 °C para 3 °C (*média confiança*);
- As mudanças climáticas pressionarão cada vez mais a produção e o acesso aos alimentos, especialmente em regiões vulneráveis, prejudicando a segurança alimentar e nutricional;

nal (*alta confiança*). Os aumentos na frequência, intensidade e gravidade das secas, inundações, ondas de calor e o aumento contínuo do nível do mar aumentarão os riscos para a segurança alimentar (*alta confiança*) em regiões vulneráveis de moderado a alto entre 1,5 °C a 2 °C nível de aquecimento global, sem ou baixos níveis de adaptação (*média confiança*). Em um nível de aquecimento global de 2 °C ou mais no médio prazo, os riscos de segurança alimentar devido às mudanças climáticas serão mais graves, levando à desnutrição e deficiências de micronutrientes, concentradas na África Subsaariana, Ásia Meridional, América Central e do Sul e Pequenas Ilhas (*alta confiança*). O aquecimento global enfraquecerá progressivamente a saúde do solo e os serviços ecossistêmicos, como a polinização, aumentará a pressão de pragas e doenças e reduzirá a biomassa de animais marinhos. Isso irá minar a produtividade alimentar em muitas regiões em terra e no oceano (*média confiança*). Em um nível de aquecimento global de 3° C ou mais em longo prazo, as áreas expostas a riscos relacionados ao clima se expandirão substancialmente em comparação com um nível de aquecimento global de 2° C ou menos (*alta confiança*), exacerbando a disparidade regional nos riscos de segurança alimentar (*alta confiança*);

- Os riscos das mudanças climáticas para cidades, assentamentos e infraestruturas-chave aumentarão rapidamente em médio e longo prazo com o aquecimento global, especialmente em locais já expostos a altas temperaturas, ao longo do litoral ou com altas vulnerabilidades (*alta confiança*). Globalmente, a mudança populacional em cidades e assentamentos de baixa altitude levará a cerca de um bilhão de pessoas projetadas para estar em risco de perigos climáticos específicos costeiros no médio prazo em todos os cenários, inclusive em Pequenas Ilhas (*alta confiança*). A população potencialmente exposta a uma inundação costeira de 100 anos está projetada para aumentar em cerca de 20%, caso o nível médio global do mar

suba 0,15 m em relação aos níveis de 2020. Essa população exposta dobra em um aumento de 0,75 m no nível médio do mar e triplica em 1,4 m sem mudança populacional e adaptação adicional (*média confiança*). O aumento do nível do mar representa uma ameaça existencial para algumas Pequenas Ilhas e algumas costas baixas (*média confiança*). Até 2100, o valor dos ativos globais dentro das futuras planícies de inundação costeira de 1 em 100 anos está projetado entre US\$ 7,9 e US\$ 12,7 trilhões (valor de 2011) sob o RCP 4.5, subindo para entre US\$ 8,8 e US\$ 14,2 trilhões sob RCP 8.5 (*média confiança*). Os custos de manutenção e reconstrução da infraestrutura urbana, incluindo construção, transporte e energia, aumentarão de acordo com o nível de aquecimento global (*média confiança*);

- Em médio e longo prazo, o deslocamento das populações aumentará com a intensificação das fortes precipitações e inundações associadas, dos ciclones tropicais, das secas e, cada vez mais, do aumento do nível do mar (*alta confiança*). Em níveis progressivos de aquecimento, ocorreriam migrações involuntárias de regiões com alta exposição e baixa capacidade adaptativa (*média confiança*). Em comparação com outros fatores socioeconômicos, a influência do clima no conflito é avaliada como relativamente fraca (*alta confiança*). Ao longo dos caminhos socioeconômicos de longo prazo que reduzem os fatores não climáticos, os riscos de conflitos violentos diminuiriam (*média confiança*). Em níveis mais altos de aquecimento global, os impactos do clima e dos extremos climáticos, particularmente a seca, aumentaria a vulnerabilidade, favorecendo cada vez mais os violentos conflitos intraestatais (*média confiança*).

### ***Desenvolvimento Resiliente ao Clima***

O desenvolvimento resiliente ao clima envolve questões de equidade e transições de sistemas em terra, oceano e ecossistemas;

questões urbanas e de infraestrutura; energia; indústria e sociedade, incluindo adaptações para a saúde humana, ecossistêmica planetária. A busca pelo desenvolvimento resiliente ao clima concentra-se tanto no local onde as pessoas e os ecossistemas estão localizados, quanto na proteção e manutenção da função do ecossistema em escala planetária. Os caminhos para o avanço do desenvolvimento resiliente ao clima são trajetórias de desenvolvimento que integram com sucesso as ações de mitigação e adaptação para promover o desenvolvimento sustentável. Os caminhos de desenvolvimento resilientes ao clima podem coincidir temporariamente com qualquer cenário RCP e SSP usado ao longo do AR6, mas não seguem nenhum cenário específico em todos os lugares e ao longo do tempo.

### ***Condições para o Desenvolvimento Resiliente ao Clima***

- Evidências de impactos observados, riscos projetados, níveis e tendências de vulnerabilidade e limites de adaptação demonstram que a ação mundial de desenvolvimento resiliente ao clima é mais urgente do que previamente avaliada no AR5. Respostas abrangentes, eficazes e inovadoras podem aproveitar as sinergias e reduzir as compensações entre adaptação e mitigação para promover o desenvolvimento sustentável (*confiança muito alta*);
- Há uma janela de oportunidade cada vez mais estreita para permitir o desenvolvimento resiliente ao clima. Múltiplos caminhos de desenvolvimento resilientes ao clima pelos quais as comunidades, o setor privado, os governos e as nações podem buscar o desenvolvimento resiliente ao clima ainda são possíveis – cada um envolvendo e resultante de diferentes escolhas sociais influenciadas por diferentes contextos, oportunidades e restrições nas transições do sistema;
- Os caminhos de desenvolvimento resilientes ao clima são progressivamente limitados por cada incremento de aquecimento (em particular acima de 1,5 °C), pelas desigualdades sociais e econômicas, pelo equilíbrio entre adaptação e mi-

tigação variando por circunstâncias e geografias nacionais, regionais e locais, de acordo com capacidades, incluindo recursos, vulnerabilidade, cultura e valores, e pelas escolhas de desenvolvimento passadas que levaram a emissões passadas e cenários de aquecimento futuros. Tais fatores limitam os caminhos remanescentes de desenvolvimento resilientes ao clima e as maneiras pelas quais as trajetórias de desenvolvimento são moldadas pela equidade e justiça social e climática (*confiança muito alta*);

- As oportunidades para o desenvolvimento resiliente ao clima não são distribuídas de forma equitativa em todo o mundo (*confiança muito alta*). Os impactos e riscos climáticos exacerbam a vulnerabilidade e as desigualdades sociais e econômicas e, conseqüentemente, aumentam os desafios de desenvolvimento persistentes e agudos, especialmente em regiões e sub-regiões em desenvolvimento e em locais particularmente expostos, incluindo costas, pequenas ilhas, desertos, montanhas e regiões polares. Isso, por sua vez, prejudica os esforços para alcançar o desenvolvimento sustentável, particularmente para comunidades vulneráveis e marginalizadas (*confiança muito alta*);
- A incorporação de adaptação, mitigação efetiva e equitativa no planejamento do desenvolvimento pode reduzir a vulnerabilidade, conservar e restaurar ecossistemas, bem como permitir o desenvolvimento resiliente ao clima. Isso é especialmente desafiador em localidades com lacunas de desenvolvimento persistentes e recursos limitados (*alta confiança*). Existem compensações dinâmicas e prioridades concorrentes entre mitigação, adaptação e desenvolvimento. Soluções integradas e inclusivas, orientadas para o sistema baseadas na equidade, justiça social e climática, reduzem os riscos e permitem o desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança*).

### ***Habilitando o Desenvolvimento Resiliente ao Clima***

- Em médio e longo prazos, o deslocamento populacional aumentará com a intensificação de fortes precipitações e inundações associadas, ciclones tropicais, secas e, cada vez mais, o aumento do nível do mar (*alta confiança*). Em níveis progressivos de aquecimento, ocorreria migração involuntária de regiões com alta exposição e baixa capacidade adaptativa (*média confiança*). Em comparação com outros fatores socioeconômicos, a influência do clima no conflito é avaliada como relativamente fraca (*alta confiança*). Ao longo dos caminhos socioeconômicos de longo prazo que reduzem os fatores não climáticos, o risco de conflito violento diminuiria (*média confiança*). Em níveis mais altos de aquecimento global, os impactos do clima e dos extremos climáticos, particularmente a seca, aumentando a vulnerabilidade, afetarão cada vez mais os violentos conflitos intraestatais (*média confiança*);
- O desenvolvimento resiliente ao clima é viabilizado quando os governos, a sociedade civil e o setor privado fazem escolhas de desenvolvimento inclusivas que priorizam a redução de riscos, a equidade e a justiça, e quando os processos de tomada de decisões, finanças e ações são integrados em todos os níveis de governança, setores e prazos (*confiança muito alta*). O desenvolvimento resiliente ao clima é facilitado pela cooperação internacional e por governos em todos os níveis, trabalhando com comunidades, sociedade civil, órgãos educacionais, instituições científicas, mídia, investidores e empresas. Além disso, esse progresso resiliente é viabilizado com a criação de parcerias com grupos tradicionalmente marginalizados, incluindo mulheres, jovens, povos indígenas, comunidades locais e minorias étnicas (*alta confiança*). Essas parcerias são mais eficazes quando apoiadas por liderança política, instituições, recursos, incluindo finanças, bem como serviços climáticos, informações e ferramentas de apoio à decisão (*alta confiança*);

- A governança inclusiva contribui para resultados de adaptação mais eficazes e duradouros e permite o desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança*). Processos inclusivos fortalecem a capacidade dos governos e outras partes interessadas de considerar conjuntamente fatores como a taxa e magnitude das mudanças e incertezas, impactos associados e prazos de diferentes caminhos de desenvolvimento resilientes ao clima, dadas as escolhas de desenvolvimento anteriores que levaram a emissões passadas e cenários de aquecimento global futuro (*alta confiança*). As escolhas sociais associadas são feitas continuamente por meio de interações em arenas de engajamento do nível local ao internacional. A qualidade e o resultado dessas interações ajudam a determinar se os caminhos de desenvolvimento se aproximam ou se afastam do desenvolvimento resiliente ao clima (*média confiança*);
- A governança para o desenvolvimento resiliente ao clima é mais eficaz quando apoiada por instituições e práticas formais e informais que estão bem alinhadas em todas as escalas, setores, domínios políticos e prazos. Os esforços de governança que promovem o desenvolvimento resiliente ao clima levam em conta a natureza dinâmica, incerta e específica do contexto do risco relacionado ao clima e suas interconexões com riscos não climáticos. As instituições que permitem o desenvolvimento resiliente ao clima são flexíveis e responsivas aos riscos emergentes, e facilitam a ação sustentada e oportuna. A governança para o desenvolvimento resiliente ao clima é possibilitada por recursos humanos e tecnológicos adequados e apropriados, informações, capacidades e financiamento (*alta confiança*).

### ***Desenvolvimento Resiliente ao Clima para Sistemas Naturais e Humanos***

- As interações entre a mudança da forma urbana, a exposição e a vulnerabilidade podem criar riscos e perdas induzidas pelas mudanças climáticas para cidades e assentamen-

tos. No entanto, a tendência global de urbanização também oferece uma oportunidade crítica no curto prazo para promover o desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança*). O planejamento integrado e inclusivo e o investimento na tomada de decisões cotidianas sobre infraestrutura urbana, incluindo infraestruturas sociais, ecológicas e edificações, podem aumentar significativamente a capacidade de adaptação dos assentamentos urbanos e rurais. Resultados equitativos contribuem para múltiplos benefícios para a saúde, bem-estar e serviços ecossistêmicos, inclusive para povos indígenas, comunidades marginalizadas e vulneráveis (*alta confiança*). O desenvolvimento resiliente ao clima em áreas urbanas também apoia a capacidade de adaptação em mais locais rurais através da manutenção de cadeias de abastecimento periurbanas de bens, serviços e fluxos financeiros (*média confiança*). As cidades e assentamentos costeiros desempenham um papel especialmente importante no avanço do desenvolvimento resiliente ao clima (*alta confiança*);

- A adoção de ações integradas para a resiliência climática para evitar riscos climáticos requer uma tomada de decisão urgente para o novo ambiente construído e a adaptação de projetos urbanos, infraestrutura e uso do solo existentes. Com base nas circunstâncias socioeconômicas, as ações de adaptação e desenvolvimento sustentável proporcionarão múltiplos benefícios, inclusive para a saúde e o bem-estar, principalmente quando apoiadas por governos nacionais, organizações não governamentais e agências internacionais que trabalham em vários setores em parceria com as comunidades locais. Parcerias equitativas entre governos locais e municipais, setor privado, povos indígenas, comunidades locais e sociedade civil podem, inclusive por meio da cooperação internacional, promover o desenvolvimento resiliente ao clima abordando desigualdades estruturais, riscos entre cidades e a integração de comunidades indígenas e conhecimento local (*alta confiança*);

- Os sistemas urbanos são locais críticos e interconectados para permitir o desenvolvimento resiliente ao clima, especialmente na costa. As cidades e assentamentos costeiros desempenham papel fundamental na mudança para um desenvolvimento mais resiliente ao clima, dado que, em primeiro lugar, quase 11% da população global – 896 milhões de pessoas – viviam na Zona Costeira de Baixa Elevação em 2020, potencialmente aumentando para mais de 1 bilhão de pessoas até 2050. Essas pessoas e os ecossistemas costeiros enfrentam riscos agravados pelo clima, incluindo a elevação do nível do mar. Em segundo lugar, essas cidades e assentamentos costeiros fazem contribuições importantes para o desenvolvimento resiliente ao clima por meio de seu papel vital nas economias nacionais e nas comunidades do interior, nas cadeias de suprimentos do comércio global, no intercâmbio cultural e nos centros de inovação (*alta confiança*);
- Proteger e restaurar os ecossistemas é essencial para manter e aumentar a resiliência da biosfera (*confiança muito alta*). A degradação e a perda de ecossistemas são causas das emissões de GEE e estão em risco crescente de serem exacerbadas pelos impactos das mudanças climáticas, incluindo secas e incêndios florestais (*alta confiança*). O desenvolvimento resiliente ao clima evita medidas de adaptação e mitigação que danificam os ecossistemas (*alta confiança*). Exemplos documentados de impactos adversos de medidas baseadas na terra destinadas a mitigação, quando mal implementadas, incluem arborização de pastagens, savanas e turfeiras e riscos de culturas bioenergéticas em grande escala para o abastecimento de água, segurança alimentar e biodiversidade (*alta confiança*);
- A biodiversidade e os serviços ecossistêmicos têm capacidade limitada para se adaptar aos níveis crescentes de aquecimento global, o que tornará o desenvolvimento resiliente ao clima progressivamente mais difícil de alcançar além do aquecimento de 1,5 °C (*confiança muito alta*);

- É inequívoco que as mudanças climáticas já perturbaram os sistemas humanos e naturais. As tendências de desenvolvimento passadas e atuais (emissões passadas, desenvolvimento e mudanças climáticas) não promoveram o desenvolvimento global resiliente ao clima (*confiança muito alta*). As escolhas e ações da sociedade implementadas na próxima década determinarão até que ponto os caminhos de médio e longo prazo proporcionarão um desenvolvimento resiliente ao clima mais alto ou mais baixo (*alta confiança*). É importante ressaltar que as perspectivas de desenvolvimento resiliente ao clima são cada vez mais limitadas se as emissões atuais de GEE não diminuírem rapidamente, especialmente se o aquecimento global de 1,5 °C for excedido no curto prazo (*alta confiança*). Essas perspectivas são limitadas pelo desenvolvimento passado, emissões e mudanças climáticas, e possibilitadas por governança inclusiva, recursos humanos e tecnológicos adequados e apropriados, informações, capacidades e finanças (*alta confiança*);
- Governança inclusiva, investimento alinhado ao desenvolvimento resiliente ao clima, acesso à tecnologia apropriada e financiamento rapidamente ampliado e capacitação dos governos em todos os níveis, do setor privado e da sociedade civil permitem o desenvolvimento resiliente ao clima. A experiência mostra que os processos de desenvolvimento resilientes ao clima são oportunos, antecipatórios, integrativos, flexíveis e focados na ação. Objetivos comuns e aprendizagem social constroem capacidade adaptativa para o desenvolvimento resiliente ao clima. Ao implementar a adaptação e a mitigação em conjunto, e levando em consideração as compensações, vários benefícios e sinergias para o bem-estar humano, bem como a saúde do ecossistema e do planeta podem ser alcançados. As perspectivas de desenvolvimento resiliente ao clima são aumentadas por processos inclusivos envolvendo conhecimento local e co-

nhcimento indígena, bem como processos que coordenam os riscos e as instituições. O desenvolvimento resiliente ao clima é possibilitado pelo aumento da cooperação internacional, incluindo a mobilização e melhoria do acesso ao financiamento, particularmente para regiões, setores e grupos vulneráveis (*alta confiança*);

- A evidência científica cumulativa é clara: a mudança climática é uma ameaça ao bem-estar humano e à saúde planetária. Qualquer atraso adicional na ação global antecipada sobre adaptação e mitigação perderá uma janela de oportunidade breve e que se fecha rapidamente para garantir um futuro habitável e sustentável para todos (*confiança muito alta*).

## **5. Relatório de avaliação “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change” (Mudança Climática 2022: Mitigação das Mudanças Climáticas)**

O relatório “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change” (IPCC, 2022b) elaborado pelo WGIII do IPCC-AR6, lançado em abril de 2022, é a análise científica mais abrangente sobre como podemos mitigar as mudanças climáticas. A seguir serão apresentadas as principais avaliações desse relatório.

### ***Desenvolvimentos Recentes e Tendências Atuais***

- As emissões líquidas cumulativas históricas de CO<sub>2</sub> de 1850 a 2019 foram de 2400±240 GtCO<sub>2</sub> (*alta confiança*). Destas, mais da metade (58%) ocorreu entre 1850 e 1989 [1400±195 GtCO<sub>2</sub>], e cerca de 42% entre 1990 e 2019 [1000±90 GtCO<sub>2</sub>]. Ainda, 17% das emissões líquidas acumuladas históricas de CO<sub>2</sub> desde 1850 ocorreram entre 2010 e 2019 [410±30 GtCO<sub>2</sub>] (veja a anotação 1). Em comparação, a estimativa atual do orçamento de carbono restante a partir de 2020 para limitar o aquecimento a 1,5 °C com uma probabilidade de 50% foi avaliada como 500

GtCO<sub>2</sub> e como 1150 GtCO<sub>2</sub> para uma probabilidade de 67 % para limitar o aquecimento a 2 °C. Os orçamentos de carbono restantes dependem da quantidade de mitigação não-CO<sub>2</sub> ( $\pm 220$  GtCO<sub>2</sub>) e estão ainda sujeitos a incertezas geofísicas. Mesmo levando em conta as incertezas, as emissões históricas entre 1850 e 2019 constituem uma grande parte dos orçamentos totais de carbono para esses níveis de aquecimento global (veja as anotações 2 e 3);

**Anotação 1:** *para consistência com o WGI, as emissões cumulativas históricas de CO<sub>2</sub> de 1850-2019 são relatadas usando intervalos de confiança de 68%.*

**Anotação 2:** *o orçamento de carbono é a quantidade máxima de emissões antropogênicas globais líquidas cumulativas de CO<sub>2</sub> que resultariam na limitação do aquecimento global a um determinado nível com uma determinada probabilidade, levando em consideração o efeito de outros fatores climáticos antropogênicos. Isso é referido como o orçamento de carbono total quando expresso a partir do período pré-industrial, e como o orçamento de carbono restante quando expresso a partir de uma data especificada recente. Os orçamentos totais de carbono relatados aqui são a soma das emissões históricas de 1850 a 2019 e os orçamentos de carbono restantes de 2020 em diante, que se estendem até que as emissões líquidas global zero de CO<sub>2</sub> sejam atingidas.*

**Anotação 3:** *as incertezas para os orçamentos totais de carbono não foram avaliadas e podem afetar as frações calculadas específicas.*

- As emissões médias anuais de GEE durante 2010 - 2019 foram maiores que qualquer década anterior, mas a taxa de crescimento entre 2010 e 2019 foi menor que entre 2000 e 2009 (*alta confiança*). As emissões antropogênicas líquidas globais de GEE foram de  $59 \pm 6,6$  GtCO<sub>2</sub>-eq em 2019, cerca de 12% ( $6,5$  GtCO<sub>2</sub>-eq) maior que em 2010, e 54% (21

GtCO<sub>2</sub>-eq) maior que em 1990. A média anual durante a década de 2010-2019 foi de 56±6,0 GtCO<sub>2</sub>-eq, 9,1 GtCO<sub>2</sub>-eq/ano, maior que em 2000-2009. Esse é o maior aumento nas emissões médias decenais já registradas. A taxa média anual de crescimento diminuiu em 2,1% ao ano entre 2000 e 2009 para 1,3% ao ano entre 2010 e 2019 (*alta confiança*);

- As emissões antropogênicas líquidas de GEE aumentaram desde 2010 em todos os principais setores do mundo. Uma parcela crescente das emissões pode ser atribuída às áreas urbanas. As reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> de combustíveis fósseis e processos industriais, devido a melhorias na intensidade energética do PIB e na intensidade de carbono da energia, foram menores que os aumentos de emissões decorrentes do aumento dos níveis de atividade global na indústria, fornecimento de energia, transporte, agricultura e edifícios (*alta confiança*);
- Em 2019, aproximadamente 34% [20 GtCO<sub>2</sub>-eq] do total de emissões antropogênicas líquidas de GEE vieram do setor de fornecimento de energia, 24% [14 GtCO<sub>2</sub>-eq] da indústria, 22% [13 GtCO<sub>2</sub>-eq] da agricultura, silvicultura e outros usos da terra (AFOLU), 15% [8,7 GtCO<sub>2</sub>-eq] de transporte e 6% [3,3 GtCO<sub>2</sub>-eq] de edificações;
- Se as emissões da produção de eletricidade e calor são atribuídas aos setores que usam a energia final, 90% dessas emissões indiretas são alocadas aos setores da indústria e construção, aumentando suas participações relativas de emissões de GEE de 24% para 34%, e de 6% para 16%, respectivamente. Depois de realocar as emissões da produção de eletricidade e calor, o setor de fornecimento de energia responde por 12% das emissões antrópicas líquidas globais de GEE (*alta confiança*);
- O crescimento médio anual das emissões de GEE entre 2010 e 2019 desacelerou em relação à década anterior no fornecimento de energia [de 2,3% para 1,0%] e na indústria

[de 3,4% para 1,4%], mas permaneceu aproximadamente constante em cerca de 2% ao ano no setor de transporte (*alta confiança*). O crescimento das emissões em AFOLU, compreendendo emissões da agricultura (principalmente CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) e silvicultura e outros usos da terra (principalmente CO<sub>2</sub>) é mais incerto do que em outros setores, devido à alta participação e incerteza das emissões de uso da terra, mudança de uso da terra e silvicultura (CO<sub>2</sub>-LU-LUCF) (*média confiança*). Cerca de metade das emissões líquidas totais de AFOLU são de CO<sub>2</sub> LULUCF, predominantemente de desmatamento (*média confiança*);

- A parcela global de emissões que pode ser atribuída às áreas urbanas está aumentando. Em 2015, as emissões urbanas foram estimadas em 25 GtCO<sub>2</sub>-eq (cerca de 62%) e, em 2020, 29 GtCO<sub>2</sub>-eq (67-72%). As causas da emissão urbana de GEE são complexas e incluem tamanho da população, renda, estado de urbanização e forma urbana (*alta confiança*);
- As contribuições regionais para as emissões globais de GEE continuam a diferir amplamente. As variações nas emissões per capita regionais e nacionais refletem, em parte, diferentes estágios do desenvolvimento, mas também variam amplamente em níveis de renda semelhantes. Os 10% dos domicílios com as maiores emissões per capita contribuem com uma parcela desproporcionalmente grande das emissões domésticas globais de GEE. Pelo menos 18 países têm sustentado reduções de emissões de GEE por mais de 10 anos (*alta confiança*).
- As tendências de emissões de GEE ao longo de 1990-2019 variam amplamente entre as regiões e ao longo do tempo, em diferentes estágios de desenvolvimento. As médias globais de emissões antropogênicas líquidas *per capita* de GEE aumentaram de 7,7 para 7,8 tCO<sub>2</sub>-eq, variando de 2,6 tCO<sub>2</sub>-eq a 19 tCO<sub>2</sub>-eq entre as regiões. Os Países Menos Desenvolvidos (PMDs) e os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) têm emissões *per capita* muito mais baixas (1,7

- tCO<sub>2</sub>-eq, 4,6 tCO<sub>2</sub>-eq, respectivamente) do que a média global (6,9 tCO<sub>2</sub>-eq), excluindo CO<sub>2</sub>-LULUCF (*alta confiança*);
- As contribuições históricas para as emissões antropogênicas líquidas cumulativas de CO<sub>2</sub> entre 1850 e 2019 variam substancialmente entre as regiões em magnitude total, mas também, em termos de contribuições para CO<sub>2</sub>-FFI (queima de combustíveis fósseis e processos industriais) (1650 +/- 73 GtCO<sub>2</sub>-eq) e CO<sub>2</sub>-LULUCF líquido (760 +/- 220 GtCO<sub>2</sub>-eq). Os Países Menos Desenvolvidos contribuíram com menos de 0,4% das emissões cumulativas históricas de CO<sub>2</sub>-FFI entre 1850 e 2019, enquanto os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento contribuíram com 0,5% (*alta confiança*);
  - Em 2019, cerca de 48% da população global vive em países que emitem em média mais de 6t CO<sub>2</sub>-eq *per capita*, excluindo CO<sub>2</sub>-LULUCF, em que 35% da população vive em países que emitem mais de 9 tCO<sub>2</sub>-eq *per capita*. Outros 41% das pessoas vivem em países que emitem menos de 3 tCO<sub>2</sub>-eq *per capita*. Erradicar a pobreza extrema, a pobreza energética e proporcionar padrões de vida decentes a todos nessas regiões, podem ser alcançados sem um aumento significativo das emissões globais (*alta confiança*);
  - Pelo menos 18 países sustentaram reduções de emissões de GEE baseadas na produção e no consumo por mais de 10 anos. As reduções foram associadas à descarbonização da oferta de energia, ganhos de eficiência energética e redução da demanda de energia, que resultaram tanto em políticas quanto mudanças na estrutura econômica. A redução se deu com base na produção de um terço ou mais desde o pico de suas emissões, e alguns alcançaram vários anos de taxas consecutivas de redução de emissões, cerca de 4% ao ano, comparáveis às reduções globais em cenários que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%) ou inferior. Essas reduções compensaram apenas parcialmente o crescimento das emissões globais (*alta confiança*);

- O custo unitário de várias tecnologias, de baixa emissão, caíram continuamente desde 2010. Os pacotes de políticas personalizadas ou abrangentes de inovação permitiram essas reduções de custo e apoiaram a adoção global, ambas associadas à difusão global de tecnologias de baixa emissão. A inovação ficou para trás nos países em desenvolvimento, devido a condições de habilitação mais fracas. A digitalização pode permitir reduções de emissões, mas pode ter efeitos colaterais adversos, a menos que seja adequadamente governada (*alta confiança*);
- De 2010 a 2019, houve redução nos custos unitários de energia solar (85%), energia eólica (55%) e baterias de íons de lítio (85%) e grandes aumentos em sua implantação, por exemplo, > 10x para energia solar e > 100x para veículos elétricos (EVs), variando amplamente entre as regiões. A combinação de instrumentos de política que reduziram os custos e estimularam a adoção inclui P&D público, financiamento para projetos piloto e de demonstração e instrumentos de atração de demanda, como subsídios de implantação para atingir a escala (*alta confiança*);
- As tecnologias digitais podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e o alcance de diversos ODS (*alta confiança*). Por exemplo, sensores podem melhorar o gerenciamento de energia em todos os setores, aumentar a eficiência energética e promover a adoção de muitas tecnologias de baixa emissão, incluindo energia renovável descentralizada, criando oportunidades econômicas (*alta confiança*). No entanto, alguns desses ganhos de mitigação das mudanças climáticas podem ser reduzidos ou contrabalançados pelo crescimento da demanda por bens e serviços devido ao uso de dispositivos digitais (*alta confiança*). A digitalização pode envolver *trade-offs* em vários ODS, aumentando o lixo eletrônico, além de exacerbar a divisão digital existente. A tecnologia digital suporta a descarbonização apenas se governada adequadamente (*alta confiança*);

- As emissões globais de GEE em 2030, associadas à implementação de contribuições determinadas nacionalmente (NDCs) anunciadas antes da COP26, tornariam provável que o aquecimento excedesse 1,5 °C durante o século XXI. Provavelmente, limitar o aquecimento abaixo de 2 °C dependeria de uma rápida aceleração dos esforços de mitigação após 2030. As políticas implementadas até o final de 2020 devem resultar em emissões globais de GEE mais altas que as implícitas nas NDCs (*alta confiança*);
- Permanece uma lacuna entre as emissões globais de GEE em 2030 associadas à implementação de NDCs anunciadas antes da COP26 e aquelas associadas a caminhos de mitigação modelados assumindo ação imediata. A lacuna depende do nível de aquecimento global considerado de elementos incondicionais ou também condicionais das NDCs são considerados (*alta confiança*);
- As emissões globais em 2030 associadas à implementação das NDCs anunciadas antes da COP26 são menores que as emissões implícitas nas NDCs originais (*alta confiança*). A lacuna de emissão original caiu cerca de 20% a um terço em relação às vias que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%) com ação imediata, e cerca de 15-20% em relação às vias que limitam o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) sem *overshoot* ou limitado (*média confiança*);
- As vias de emissões globais modeladas, consistentes com as NDCs anunciadas antes da COP26 que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%), implicam taxas médias anuais de redução de emissões globais de GEE de 0-0,7 GtCO<sub>2</sub>-eq por ano durante a década de 2020-2030, com uma aceleração para 1,4-2,0 GtCO<sub>2</sub>-eq por ano durante 2030-2050 (*média confiança*). Investimentos contínuos em infraestrutura de alta emissão inabalável, desenvolvimento e implantação, limitados de alternativas de baixa emissão antes de 2030 atuariam como barreiras a essa aceleração e aumentariam os riscos de viabilidade (*alta confiança*);

- As vias de emissão globais modeladas, consistentes com as NDCs anunciadas antes da COP26, provavelmente excederão 1,5 °C durante o século XXI. Aqueles caminhos que então retornam o aquecimento para 1,5 °C em 2100 com uma probabilidade de 50% ou mais implicam em um aumento de temperatura de 0,15 °C - 0,3 °C. Nesses caminhos, as emissões líquidas cumulativas globais de CO<sub>2</sub> são -380 [-860 a -200] GtCO<sub>2</sub> na segunda metade do século, e há uma rápida aceleração de outros esforços de mitigação em todos os setores pós-2030. Tais caminhos de superação implicam no aumento do risco relacionado ao clima e estão sujeitos a maiores preocupações de viabilidade, maiores riscos sociais e ambientais, em comparação com caminhos que limitam o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) sem excesso ou limitado (*alta confiança*);
- O WGIII mostra as emissões globais de GEE entre 2015-2050 para quatro tipos de caminhos globais modelados avaliados:
- Tendência das políticas implementadas: caminhos com emissões de GEE projetadas no curto prazo em linha com as políticas implementadas até o final de 2020 e estendidas com níveis de ambição comparáveis além de 2030;
- Limitar a 2 °C (> 67%) ou retornar o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) após um alto *overshoot*, NDCs até 2030: caminhos com emissões de GEE até 2030 associados à implementação de NDCs anunciados antes da COP26, seguidos por reduções aceleradas de emissões;
- Limite a 2 °C (> 67%) com ação imediata após 2020;
- Limite a 1,5 °C (> 50%) sem ultrapassagem ou ultrapassagem limitada: todos esses caminhos assumem ação imediata após 2020.

### ***Transformações do Sistema para Limitar o Aquecimento Global***

- Prevê-se que as emissões globais de GEE atinjam o pico entre 2020 e, mais tardar, antes de 2025 em vias globais mo-

deladas que limitam o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) sem excesso ou limitado, e naquelas que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%). Em ambos, as reduções rápidas e profundas de emissões de GEE seguem ao longo de 2030, 2040 e 2050 (*alta confiança*). Sem um fortalecimento de políticas, as emissões de GEE devem aumentar além de 2025, levando a um aquecimento global médio de 3,2 [2,2 a 3,5] °C até 2100 (*média confiança*);

- As emissões globais líquidas de GEE estão projetadas para cair dos níveis de 2019 em 27% [13-45%] até 2030, e 63% [52-76%] até 2050 em caminhos globais modelados que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%), assumindo uma ação imediata. Isso se compara às reduções de 43% [34-60%] até 2030 e de 84% [73-98%] até 2050, em vias que limitam o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) sem excesso ou limitado (*alta confiança*). Em caminhos modelados que retornam o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) após um alto *overshoot*, as emissões de GEE são reduzidas em 23% [0-44%] em 2030 e em 75% [62-91%] em 2050 (*alta confiança*). Os caminhos modelados e anunciadas antes da COP26, até 2030, não assumem nenhum aumento na ambição depois disso, têm emissões mais altas, levando a um aquecimento global médio de 2,8 °C [2,1-3,4 °C] até 2100 (*média confiança*);
- Em cenários de caminhos modelados que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%), as emissões líquidas globais de CO<sub>2</sub> são reduzidas em comparação com as emissões modeladas de 2019 em 27% [11-46%] em 2030 e em 52% [36-70%] em 2040; e as emissões globais de CH<sub>4</sub> são reduzidas em 24% [9-53%] em 2030 e em 37% [20-60%] em 2040. Há reduções semelhantes de emissões não-CO<sub>2</sub> até 2050 em ambos os tipos de vias (cenários SSPs): CH<sub>4</sub> é reduzido em 45% [25-70%]; N<sub>2</sub>O é reduzido em 20% [-5 – 55%]; e os F-Gases (gás fluorado) são reduzidos em 85% [20-90%]. Na maioria dos cenários modelados, esse é o potencial téc-

nico máximo para reduções antropogênicas de CH<sub>4</sub> nos modelos subjacentes (*alta confiança*). Reduções adicionais de emissões, podem ser alcançadas por meio de mudanças nos níveis de atividade e/ou inovações tecnológicas além daquelas representadas na maioria das vias (*média confiança*). Reduções mais altas de emissões de CH<sub>4</sub> poderiam reduzir ainda mais o pico aquecimento (*alta confiança*);

- As vias modeladas globais que se enquadram na categoria de temperatura mais baixa da literatura avaliada estão, em média, associadas a um pico de aquecimento mediano mais alto no AR6 em comparação com vias na mesma categoria no SR 1.5 (IPCC, 2018) (veja a anotação 4). A probabilidade de limitar o aquecimento a 1.5 °C diminuiu em média em comparação com SR1.5. Isso ocorre porque as emissões de GEE aumentaram desde 2017 e muitos caminhos recentes apresentam emissões projetadas mais altas até 2030, emissões líquidas cumulativas mais altas de CO<sub>2</sub> e datas ligeiramente posteriores para atingir zero CO<sub>2</sub> líquido ou emissões líquidas zero de GEE. Altos desafios de mitigação, por exemplo, devido a suposições de mudanças tecnológicas lentas, altos níveis de crescimento populacional global e alta fragmentação como no Caminho Socioeconômico Compartilhado SSP3, podem renderizar caminhos modelados que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%) ou inferior inviável (*média confiança*);

**Anotação 4:** o SR 1.5 é um relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1.5 °C acima dos níveis pré-industriais e os caminhos de emissão global de GEE relacionados, no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça das mudanças climáticas, desenvolvimento sustentável e esforços para erradicar a pobreza.

- A implantação de CDR para contrabalançar as emissões residuais são difíceis de reduzir e é inevitável se as emis-

sões líquidas zero de CO<sub>2</sub> ou GEE forem alcançadas. A ampliação da implantação do CDR depende do desenvolvimento de abordagens eficazes para abordar as restrições de viabilidade e sustentabilidade, especialmente em grandes escalas (*alta confiança*);

- CDR refere-se a atividades antropogênicas que removem CO<sub>2</sub> da atmosfera e o armazenam de forma durável em reservatórios geológicos, terrestres ou oceânicos, ou em produtos. Os métodos de CDR variam em termos de maturidade, processo de remoção, prazo de armazenamento de carbono, meio de armazenamento, potencial de mitigação, custo, cobenefícios, impactos, riscos e requisitos de governança (*alta confiança*). Especificamente, a maturidade varia de maturidade mais baixa (alcalinização do oceano) a maturidade mais alta (reflorestamento); o potencial de remoção e armazenamento varia de menor potencial (<1 GtCO<sub>2</sub> ano<sup>-1</sup>, manejo de carbono azul) a maior potencial (>3 GtCO<sub>2</sub> ano<sup>-1</sup>, agrofloresta); os custos variam de custo mais baixo (45-100 USD/tCO<sub>2</sub> para sequestro de carbono no solo) a um custo mais alto (100-300 USD/tCO<sub>2</sub> para DACCS) (*média confiança*). Os prazos estimados de armazenamento variam de décadas a séculos, de acordo com os métodos (*alta confiança*). Os processos pelos quais o CO<sub>2</sub> é removido da atmosfera são categorizados como biológicos, geoquímicos ou químicos.;
- Os impactos, riscos e cobenefícios da implantação de CDR serão altamente variáveis dependendo do método, do contexto específico do local, da implementação e da escala (*alta confiança*). O reflorestamento, a gestão florestal melhorada, o sequestro de carbono do solo, a restauração de turfeiras e a gestão de carbono azul são exemplos de métodos que podem melhorar a biodiversidade e as funções do ecossistema, emprego e meios de subsistência locais, dependendo do contexto (*alta confiança*). Em contraste, o reflorestamento ou produção de culturas de biomassa para BECCS (veja a

anotação 5) ou biochar, quando mal implementado, pode ter impactos socioeconômicos e ambientais adversos, inclusive na biodiversidade, segurança alimentar e hídrica, nos meios de subsistência locais e nos direitos dos povos indígenas, especialmente se implementado em grandes escalas e onde a posse da terra é insegura (*alta confiança*). A fertilização oceânica, se implementada, pode levar à redistribuição de nutrientes, reestruturação de ecossistemas, aumento do consumo de oxigênio e acidificação em águas mais profundas (*média confiança*);

**Anotação 5:** *BECCS é a sigla para Biomass Energy with Carbon Capture and Storage, que pode ser traduzido para o português como Sistemas de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono. Trata-se de uma tecnologia ou um conjunto de tecnologias que associa empregos da energia de biomassa a captura e armazenamento de carbono, processo realizado sempre em grande escala. Com isso, é possível sequestrar o carbono presente na atmosfera.*

- O CO<sub>2</sub> armazenado em reservatórios geológicos e oceânicos (via BECCS, DACCS, alcalinização oceânica) e como carbono no biocarvão é menos propenso à reversão humana ou natural (*alta confiança*);
- O CDR pode cumprir três funções complementares diferentes globalmente ou em nível de país: reduzir as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> ou GEE no curto prazo; contrabalancear as emissões residuais “difíceis de reduzir” para ajudar a alcançar zero emissões de CO<sub>2</sub> ou de GEE no médio prazo; alcançar emissões negativas de CO<sub>2</sub> ou GEE a longo prazo se implantadas em níveis que excedam as emissões residuais anuais (*alta confiança*);
- As rápidas reduções de emissões em todos os setores interagem com a escala futura de implantação de métodos de CDR e seus riscos, impactos e cobenefícios associados. A

implantação de métodos de CDR depende do desenvolvimento de abordagens eficazes para alcançar as restrições de sustentabilidade e viabilidade. Os facilitadores do CDR incluem P&D, ferramentas aprimoradas para avaliação e gerenciamento de risco, incentivos direcionados e desenvolvimento de métodos acordados para medição, relatório e verificação de fluxos de carbono (*alta confiança*). Os efeitos agregados da mitigação das mudanças climáticas no PIB global são pequenos em comparação com o crescimento global projetado em cenários globais modelados que quantificam as implicações macroeconômicas da mitigação das mudanças climáticas, mas que não levam em consideração os danos das mudanças climáticas nem os custos de adaptação (*alta confiança*). A redução média correspondente no crescimento anual do PIB global em 2020-2050 é de 0,04 a 0,09 pontos percentuais. Nos caminhos modelados avaliados, independentemente do nível de ação de mitigação, o PIB global deverá pelo menos dobrar (aumentar em pelo menos 100%) ao longo de 2020-2050. Para os caminhos globais modelados em outras categorias de temperatura, as reduções no PIB global em 2050 em comparação com os caminhos que pressupõem a continuação das políticas implementadas até o final de 2020 são as seguintes: 2,6 - 4,2% (C1), 1,6 - 2,8% (C2), 0,8 - 2,1% (C4), 0,5 - 1,2% (C5). As reduções correspondentes no crescimento médio anual do PIB global ao longo de 2020-2050, em pontos percentuais, são as seguintes: 0,09 - 0,14 (C1), 0,05 - 0,09 (C2), 0,03 - 0,07 (C4), 0,02 - 0,04 (C5) (veja a anotação 6). Existem grandes variações nos efeitos modelados da mitigação no PIB entre as regiões, dependendo principalmente da estrutura econômica, reduções regionais de emissões, desenho de políticas e nível de cooperação internacional (veja a anotação 7) (*alta confiança*);

**Anotação 6:** *essas estimativas são baseadas em 311 caminhos que relatam os efeitos da mitigação no PIB e que podem ser classificados em categorias de temperatura, mas que não levam em consideração os danos das mudanças climáticas nem os custos de adaptação e que, em sua maioria, não refletem os impactos econômicos dos cobenefícios da mitigação e trocas. Os intervalos fornecidos são intervalos interquartis. As implicações macroeconômicas quantificadas variam amplamente dependendo das premissas tecnológicas, formulação de metas climáticas/emissões, estrutura e premissas do modelo e até que ponto as ineficiências pré-existentes são consideradas. Os modelos que produziram as vias classificadas em categorias de temperatura não representam toda a diversidade de paradigmas de modelagem existentes, havendo na literatura modelos que encontram maiores custos de mitigação, ou inversamente menores custos de mitigação e até ganhos.*

**Anotação 7:** *em caminhos de custo-benefício modelados com um preço de carbono globalmente uniforme, sem transferências financeiras internacionais ou políticas complementares, os países intensivos em carbono e exportadores de energia devem arcar com custos de mitigação relativamente mais altos devido a uma transformação mais profunda de suas economias e mudanças nos mercados internacionais de energia.*

- As estimativas de benefícios econômicos agregados de evitar danos causados pelas mudanças climáticas e de custos reduzidos de adaptação aumentam com o rigor da mitigação (*alta confiança*). Modelos que incorporam os danos econômicos das mudanças climáticas constatam que o custo global de limitar o aquecimento a 2 °C ao longo do século XXI é menor do que os benefícios econômicos globais de reduzir o aquecimento, a menos que: *i*) os danos climáticos estejam no limite inferior da faixa; ou, *ii*) os danos futuros são descontados a taxas elevadas (*média confiança*). As vias modeladas com um pico nas emissões globais entre agora e 2025, impli-

cam transições de curto prazo mais rápidas e investimentos iniciais mais altos, mas trazem ganhos de longo prazo para a economia, bem como os benefícios anteriores dos impactos das mudanças climáticas evitados (*alta confiança*).

### ***Ligações entre Mitigação, Adaptação e Desenvolvimento Sustentável***

- A ação climática acelerada e equitativa na mitigação e a adaptação aos impactos das mudanças climáticas é fundamental para o desenvolvimento sustentável. As compensações de opções individuais podem ser gerenciadas por meio do desenho de políticas. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) adotados na Agenda 2030 da ONU para o Desenvolvimento Sustentável podem ser usados como base para avaliar a ação climática no contexto do desenvolvimento sustentável (*alta confiança*);
- A mudança climática induzida pelo homem é uma consequência de mais de um século de emissões líquidas de GEE, do uso insustentável de energia, do uso da terra e mudanças no uso do solo, no estilo de vida e padrões de consumo e produção. Sem ações de mitigação urgentes, eficazes e equitativas, as mudanças climáticas ameaçam cada vez mais a saúde e os meios de subsistência, a saúde do ecossistema e da biodiversidade. A ação climática acelerada e equitativa na mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas são fundamentais para o desenvolvimento sustentável (*alta confiança*);
- Sinergias e compensações dependem do contexto de desenvolvimento, incluindo desigualdades, levando em consideração a justiça climática (veja a anotação 8). Eles também dependem dos meios de implementação, interações intra e intersetoriais, cooperação entre países e regiões, sequenciamento, tempo e rigor das ações de mitigação, governança e desenho de políticas. Maximizar sinergias e evitar *tradeoffs*

representam desafios particulares para países em desenvolvimento, populações vulneráveis e povos indígenas com capacidade institucional, tecnológica e financeira limitada e com capital social, humano e econômico limitado. As compensações podem ser avaliadas e minimizadas dando ênfase à capacitação, finanças, governança, transferência de tecnologia, investimentos e considerações de desenvolvimento e equidade social com participação significativa de povos indígenas e populações vulneráveis (*alta confiança*);

**Anotação 8:** *o conceito de Justiça Climática surge como um desdobramento do paradigma da Justiça Ambiental e da percepção de que os impactos das mudanças climáticas atingem de forma e intensidade diferentes grupos sociais distintos.*

- Existem sinergias potenciais entre desenvolvimento sustentável, eficiência energética e energia renovável, planejamento urbano com mais espaços verdes, redução da poluição do ar e mitigação do lado da demanda, incluindo mudanças para dietas saudáveis equilibradas e sustentáveis (*alta confiança*). A eletrificação combinada com baixa energia de GEE e mudanças para o transporte público podem melhorar a saúde, o emprego e podem gerar segurança energética e proporcionar equidade (*alta confiança*). Na indústria, a eletrificação e os fluxos circulares de materiais contribuem para reduzir as pressões ambientais e aumentar a atividade econômica e o emprego (*média confiança*);
- Opções baseadas na terra, como reflorestamento e conservação de florestas, por exemplo, podem ter múltiplas sinergias com os ODS. Isso inclui aumentar a produtividade e a resiliência agrícola sustentável e a segurança alimentar, fornecendo biomassa adicional para uso humano e abordando a degradação da terra. Maximizar sinergias e gerenciar compensações depende de práticas específicas, escala de implementação, governança, capacitação, integração com o uso da terra existente

e o envolvimento de comunidades locais e os povos indígenas. Isso deve ser feito por meio de compartilhamento de benefícios apoiado por estruturas como a Neutralidade da Degradação da Terra dentro da Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos das Secas (sigla em inglês UNCCD) (*alta confiança*);

- Os métodos de CDR, como o sequestro de carbono do solo e o biochar, podem melhorar a qualidade do solo e a capacidade de produção de alimentos. A restauração de ecossistemas e o reflorestamento sequestram carbono nas plantas e no solo e podem aumentar a biodiversidade e fornecer biomassa adicional, mas podem deslocar a produção de alimentos e os meios de subsistência, o que exige abordagens integradas de planejamento do uso da terra para atender a vários objetivos, incluindo a segurança alimentar. No entanto, devido à aplicação limitada de algumas das opções hoje, existem algumas incertezas sobre os benefícios potenciais (*alta confiança*);
- Existe uma forte ligação entre desenvolvimento sustentável, vulnerabilidade e riscos climáticos. Recursos econômicos, sociais e institucionais limitados geralmente resultam em alta vulnerabilidade e baixa capacidade de adaptação, especialmente em países em desenvolvimento (*média confiança*). Várias opções de resposta proporcionam resultados de mitigação e adaptação, especialmente em assentamentos humanos, manejo da terra e em relação aos ecossistemas. No entanto, os ecossistemas terrestres e aquáticos podem ser afetados negativamente por algumas ações de mitigação, dependendo de sua implementação (*média confiança*). Políticas e planejamentos intersetoriais, coordenados, podem maximizar as sinergias e evitar ou reduzir os *tradeoffs* entre mitigação e adaptação (*alta confiança*);
- As opções de mitigação relacionadas à terra com cobenefícios potenciais para adaptação incluem agrossilvicultura,

culturas de cobertura (veja a anotação 9), consórcios e plantas perenes, restaurando assim a vegetação natural e reabilitando terras degradadas. Esses métodos podem aumentar a resiliência mantendo a produtividade da terra e protegendo e diversificando os meios de subsistência. A restauração de manguezais e zonas úmidas costeiras também sequestram carbono, ao mesmo tempo em que reduzem a erosão costeira e protegem contra tempestades, reduzindo assim os riscos de elevação do nível do mar e condições climáticas extremas (*alta confiança*);

**Anotação 9:** *as culturas de cobertura devem ser vistas como um investimento a longo prazo na melhoria da saúde do solo e da gestão agrícola. Elas podem começar a se pagar no primeiro ano de uso, ou pode levar alguns anos para levar a um retorno líquido positivo. Uma cultura de cobertura é composta por plantas usadas principalmente para retardar a erosão, melhorar a saúde do solo, aumentar a disponibilidade de água, sufocar ervas daninhas, ajudar a controlar pragas e doenças, aumentar a biodiversidade e trazer uma série de outros benefícios para as fazendas ou área urbana escolhida.*

- Políticas coordenadas, parcerias equitativas e integração de adaptação e mitigação dentro e entre os setores podem maximizar as sinergias e minimizar as compensações e, assim, aumentar o apoio à ação climática (*média confiança*). Mesmo que amplos esforços globais de mitigação sejam implementados, haverá uma grande necessidade de recursos financeiros, técnicos e humanos para adaptação. Ausência ou recursos limitados nos sistemas sociais e institucionais podem levar a respostas mal coordenadas, reduzindo assim o potencial de maximizar os benefícios de mitigação e adaptação, aumentando o risco (*alta confiança*);
- A mitigação aprimorada e a ação mais ampla para mudar os caminhos do desenvolvimento em direção à sustentabilidade

de terão consequências distributivas dentro e entre os países. A atenção à equidade, à participação ampla e significativa de todos os atores relevantes na tomada de decisões em todas as escalas, pode construir confiança social, aprofundar e ampliar o apoio a mudanças transformadoras (*alta confiança*);

- As desigualdades na distribuição das emissões e nos impactos das políticas de mitigação dentro dos países afetam a coesão social e a aceitabilidade das políticas de mitigação e demais políticas ambientais. A equidade e transições justas podem permitir ambições mais profundas de mitigação acelerada. Aplicar princípios de transição justa e implementá-los por meio de processos de tomada de decisão coletiva e participativa é uma maneira eficaz de integrar os princípios de equidade nas políticas em todas as escalas, de diferentes maneiras, dependendo das circunstâncias nacionais (*média confiança*);
- A consideração da ética e da equidade pode ajudar a lidar com a distribuição desigual de impactos adversos associados ao aumento de 1,5 °C e níveis mais altos de aquecimento global em todas as sociedades (*alta confiança*). A consideração da justiça climática pode ajudar a facilitar a mudança de caminhos de desenvolvimento em direção à sustentabilidade, inclusive por meio do compartilhamento equitativo de benefícios e ônus da mitigação, aumentando a resiliência aos impactos das mudanças climáticas, especialmente para países e comunidades vulneráveis, e apoiando equitativamente aqueles que precisam (*alta confiança*).

### ***Fortalecendo a Resposta***

- Existem opções de mitigação viáveis para implantação em escala no curto prazo. Ações fortalecidas de curto prazo, além das NDCs (anunciadas antes da UNFCCC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – na COP26), podem reduzir e/ou evitar desafios de viabilidade em longo prazo de caminhos modelados globais que

limitam o aquecimento a 1,5 °C (> 50%) sem excesso ou limitado (*alta confiança*);

- As várias opções de mitigação, notadamente energia solar, energia eólica, eletrificação de sistemas urbanos, infraestrutura urbana verde, eficiência energética, gestão do lado da demanda, melhor a gestão de florestas e culturas/pastagens e redução do desperdício e perda de alimentos, são tecnicamente viáveis, com melhor custo-benefício, e geralmente são apoiados pelo público. Isso permite a implantação em muitas regiões (*alta confiança*);
- A viabilidade das opções de mitigação varia de acordo com o contexto e o tempo. Por exemplo, a capacidade institucional para apoiar a implantação altera entre os países; a viabilidade de opções que envolvem mudanças de usos da terra em grande escala varia entre as regiões; o ordenamento do território tem um maior potencial nas fases iniciais do desenvolvimento urbano; o potencial geotérmico é específico do local; e capacidades, condições culturais e locais podem inibir ou permitir respostas do lado da demanda. A implantação de energia solar e eólica tem sido avaliada para se tornar cada vez mais viável ao longo do tempo. A viabilidade de algumas opções podem aumentar quando combinadas ou integradas, como o uso da terra tanto para agricultura quanto para produção solar centralizada (*alta confiança*);
- A viabilidade depende da escala e da velocidade de implementação. Ações de curto prazo fortalecidas e coordenadas em caminhos globais modelados com boa relação custo-benefício que limitam o aquecimento a 2 °C (> 67%) ou menos, reduzem os riscos gerais para a viabilidade das transições do sistema, em comparação com caminhos modelados com ações relativamente atrasadas ou descoordenadas (*alta confiança*);
- Combinar a mitigação com políticas para mudar os caminhos do desenvolvimento, como políticas setoriais mais amplas, políticas que induzam mudanças de estilo de vida ou comportamento, regulação financeira ou políticas ma-

croeconômicas, podem superar barreiras e abrir uma gama mais ampla de opções de mitigação (*alta confiança*). Também, podem facilitar a combinação de mitigação e outros objetivos de desenvolvimento (*alta confiança*);

- Capacidade institucional e regulatória, inovação, finanças, governança e colaboração aprimoradas em todas as escalas e políticas multiobjectivos permitem uma mitigação aprimorada e mudanças nos caminhos de desenvolvimento. Tais intervenções podem se reforçar mutuamente e estabelecer mecanismos de *feedback* positivo, resultando em mitigação acelerada (*alta confiança*);
- A governança climática permite a mitigação fornecendo uma direção geral, estabelecendo metas, integrando a ação climática em domínios políticos, aumentando a certeza regulatória, criando organizações especializadas e criando o contexto para mobilizar finanças (*média confiança*);
- Instituições climáticas nacionais eficazes abordam a coordenação entre setores, escalas e atores, criam consenso para ação entre diversos interesses e informam a definição de estratégias (*média confiança*). As instituições subnacionais complementares adaptam as ações de mitigação ao contexto local e permitem a experimentação, mas podem ser limitadas por desigualdades e restrições de recursos e capacidade (*alta confiança*). A governança eficaz requer capacidade institucional adequada em todos os níveis (*alta confiança*);
- À medida que os atores da sociedade civil, atores políticos, empresas, jovens, trabalhadores, mídia, povos indígenas e comunidades locais estão engajados, influenciam o apoio político para a mitigação das mudanças climáticas e os eventuais resultados das políticas. Fatores estruturais das circunstâncias e capacidades nacionais afetam a amplitude e a profundidade da governança climática. As opções de mitigação que se alinham com as ideias, valores e crenças predominantes são mais facilmente adotadas e implementadas.;
- Uma ampla gama de instrumentos regulatórios em nível setorial tem se mostrado eficaz na redução de emissões. Esses

instrumentos e abordagens amplas, incluindo instrumentos econômicos relevantes, são complementares (*alta confiança*). Instrumentos regulatórios projetados para serem implementados com mecanismos de flexibilidade podem reduzir custos (*média confiança*). Ampliar e aprimorar o uso de instrumentos regulatórios consistentes com as circunstâncias nacionais poderia melhorar os resultados de mitigação em aplicações setoriais, incluindo, mas não se limitando, à energia renovável, uso do solo e zoneamento, códigos de construção, eficiência energética e de veículos, padrões de combustível e baixas emissões em processos e materiais industriais (*alta confiança*);

- Instrumentos econômicos têm sido eficazes na redução de emissões, complementados por instrumentos regulatórios, principalmente em nível nacional, subnacional e regional (*alta confiança*). Quando implementados, os instrumentos de precificação de carbono incentivaram medidas de redução de emissões de baixo custo, mas foram menos eficazes, por conta própria e a preços vigentes durante o período de avaliação, para promover medidas de custos mais altos, necessárias para reduções adicionais (*média confiança*). Os impactos de equidade e distribuição de tais instrumentos de precificação de carbono podem ser abordados usando a receita dos impostos de carbono ou do comércio de emissões para apoiar famílias de baixa renda, entre outras abordagens (*alta confiança*). A remoção do subsídio de combustível fóssil é projetada por vários estudos para reduzir as emissões globais de CO<sub>2</sub> em 1-4% e as emissões de GEE em até 10% até 2030, variando entre as regiões (*média confiança*);
- A inovação tecnológica de baixa emissão é fortalecida através da combinação de políticas e investimentos dedicados à tecnologia, criando incentivos e oportunidades de mercado. As habilidades dos países em desenvolvimento para implantar tecnologias de baixa emissão, aproveitando os benefícios socioeconômicos e gerenciando os *tradeoffs*, seriam aprimoradas com o aumento dos recursos financeiros e da

capacidade de inovação que atualmente estão concentrados nos países desenvolvidos, juntamente com a transferência de tecnologia (*alta confiança*);

- Pacotes de políticas eficazes seriam abrangentes em cobertura, atrelados a uma visão clara de mudança, equilibrados em todos os objetivos, alinhados com tecnologias específicas e necessidades do sistema, consistentes em termos de design e adaptados às circunstâncias nacionais (*alta confiança*);
- Pacotes para toda a economia que apoiam a mitigação e evitam resultados ambientais negativos incluem: compromissos de gastos públicos de longo prazo, reforma de preços; e investimento em educação e treinamento, capital natural, P&D e infraestrutura (*alta confiança*). Eles podem cumprir metas econômicas de curto prazo enquanto reduzem as emissões e mudam os caminhos do desenvolvimento para a sustentabilidade (*média confiança*). Os investimentos em infraestrutura podem ser projetados para promover futuros de baixas emissões que atendam às necessidades de desenvolvimento (*média confiança*);
- Políticas nacionais de apoio ao desenvolvimento, difusão de tecnologia e participação em mercados internacionais para redução de emissões, podem trazer efeitos colaterais positivos para outros países (*média confiança*), embora a redução da demanda por combustíveis fósseis possa resultar em custos para os países exportadores (*alta confiança*);
- Os fluxos financeiros monitorados ficam aquém dos níveis necessários para atingir as metas de mitigação em todos os setores e regiões. O desafio de fechar as lacunas é maior nos países em desenvolvimento como um todo. A ampliação dos fluxos financeiros de mitigação pode ser apoiada por escolhas políticas claras e sinais dos governos e da comunidade internacional (*alta confiança*). A cooperação financeira internacional, acelerada, é um facilitador crítico de transições justas e de baixo GEE, e pode abordar as desigualdades no acesso ao financiamento, os custos e a vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas (*alta confiança*);

- Os requisitos médios anuais de investimento modelado para 2020 a 2030 em cenários que limitam o aquecimento a 2 °C ou 1,5 °C é um fator de três a seis vezes maior que os níveis atuais. Os investimentos totais de mitigação precisariam aumentar em todos os setores e regiões (*média confiança*). As lacunas de investimento de mitigação são amplas para todos os setores e mais ainda para o setor AFOLU em termos relativos e para países em desenvolvimento (*alta confiança*);
- O apoio financeiro acelerado para países em desenvolvimento por países desenvolvidos entre outras fontes é um facilitador crítico para melhorar as ações de mitigação e abordar as desigualdades no acesso ao financiamento. Isso inclui seus custos, termos, condições e vulnerabilidade econômica às mudanças climáticas para os países em desenvolvimento (*alta confiança*). Subsídios públicos ampliados para financiamento de mitigação e adaptação para regiões vulneráveis, especialmente na África Subsaariana, seriam rentáveis e teriam altos retornos sociais em termos de acesso à energia básica (*alta confiança*). As opções para aumentar a mitigação nas regiões em desenvolvimento incluem: níveis mais elevados de financiamento público e fluxos de financiamento privado mobilizados publicamente de países desenvolvidos para países em desenvolvimento no contexto da meta de US\$ 100 bilhões por ano; aumentar o uso de garantias públicas para reduzir riscos e alavancar fluxos privados com menor custo; desenvolvimento dos mercados de capitais locais; e construção de maior confiança nos processos de cooperação internacional (*alta confiança*). Trata-se de um esforço coordenado para tornar a recuperação pós-pandemia (COVID-19) sustentável e aumentar os fluxos de financiamento na próxima década. Isso pode acelerar a ação climática, inclusive em regiões em desenvolvimento e em países que enfrentam altos custos da dívida, sobre-endividamento e incerteza macroeconômica (*alta confiança*);
- A cooperação internacional é um facilitador fundamental para alcançar metas ambiciosas de mitigação das mudanças

climáticas. A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris estão apoiando os níveis crescentes de ambição nacional e incentivando o desenvolvimento e a implementação de políticas climáticas, embora ainda existam lacunas. Parcerias, acordos, instituições e iniciativas que operam nos níveis subglobal e setorial envolvem vários atores que estão surgindo, com níveis mistos de eficácia (*alta confiança*);

- Processos e metas internacionalmente acordados, como os da UNFCCC, do Protocolo de Kyoto e do Acordo de Paris, incluindo requisitos de transparência para relatórios nacionais sobre emissões, ações e apoio, e acompanhamento do progresso para a obtenção de contribuições determinadas nacionalmente, estão aprimorando a cooperação internacional, ambição e desenvolvimento de políticas. O apoio financeiro, tecnológico e de capacitação internacional aos países em desenvolvimento permitirá uma maior implementação e incentivará contribuições ambiciosas determinadas nacionalmente ao longo do tempo (*média confiança*);
- Existem desafios e oportunidades para melhorar a cooperação em inovação, inclusive na implementação de elementos da UNFCCC e do Acordo de Paris conforme a literatura avaliada, como em relação ao desenvolvimento e transferência de tecnologia e finanças (*alta confiança*). O apoio para fortalecer os sistemas de inovação tecnológica e as capacidades de inovação, inclusive por meio de apoio financeiro em países em desenvolvimento, aumentaria o engajamento e melhoraria a cooperação internacional em inovação (*alta confiança*);
- Acordos, instituições e iniciativas ambientais e setoriais internacionais estão ajudando, e, em alguns casos, podem ajudar a estimular investimentos de baixas emissões de GEE e a reduzir as emissões. Os acordos que tratam da destruição da camada de ozônio e da poluição atmosférica transfronteiriça estão contribuindo para a mitigação, e, em outras áreas, como as emissões atmosféricas de mercúrio, podem contri-

buir para a mitigação (*alta confiança*). As regras comerciais têm o potencial de estimular a adoção internacional de tecnologias e políticas de mitigação, mas também podem limitar a capacidade dos países de adotar políticas climáticas relacionadas ao comércio (*média confiança*). Os atuais níveis de ambição setorial variam, com aspirações de redução de emissões mais baixas na aviação e transporte internacionais, do que em muitos outros setores (*média confiança*).

## Referências

IPCC. **Global warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3UppyLD>. Acesso em: 16 fev. 2023

IPCC. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press, 2022a. Disponível em: <https://bit.ly/3TZhyMx>. Acesso em: 16 fev. 2023

IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press, 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3E2cfGA>. Acesso em: 16 fev. 2023

IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022b. Disponível em: <https://bit.ly/3h9CVMA>. Acesso em: 16 fev. 2023.

O'NEILL, Brian C. *et al.* The roads ahead: Narratives for shared socio-economic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

O'NEILL, Brian C. *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461-3482, 2016.

RIAHI, Keywan *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.

WCRP. World Climate Research Programme. **CMIP6**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3UpyFa1>. Acesso em: 16 fev. 2023.

## SOBRE OS AUTORES

**Antonio A. Meira Neto:** Possui doutorado em hidrologia (major) pela University of Arizona (EUA), com minor em Soil Water and Environmental Sciences (SWES). É membro do conselho da American Geophysical Union (AGU) (2019-2022). Atualmente, é Assistant Professor da Universidade do Arizona, realizando estudos sobre previsão hidrológica em cenários de mudanças climáticas. Suas áreas de interesse são aplicações de imageamento da resistividade do solo para entendimento de processos na zona vadosa, hidrologia de bacias (catchment hydrology) e teoria de tempos de trânsito (TT) aplicados a escala de bacia e parcelas.

**Diogo Costa Buarque:** Engenheiro Civil graduado na Universidade Federal de Alagoas (Ufal) e Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) e docente permanente dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPGEA/Ufes e em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua/Ufes. É pesquisador em Recursos Hídricos, desenvolvendo sua pesquisa no campo da Modelagem Hidrológica e da Geração e do Transporte de Sedimentos em Grandes Bacias Hidrográficas e na área Conservação de Água e energia em Ambientes Construídos. Possui experiência na área de Hidrologia com atuações em estudos e pesquisas em Hidrologia, Simulação Hidrológica e Hidráulica, Simulação de Sedimentos, Simulação Numérica, Previsão de Vazões, Processos Hidrológicos, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Geoprocessamento.

**Franciéli de Paula Dela Costa:** Graduada em Engenharia Ambiental pela Ufes e Licenciada em Matemática pelo Centro Universitário Claretiano (Claretiano). Possui Especialização em Matemática e Física pela Faveni Faveni. Atualmente é doutoranda no Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (Ufes). Tem experiência em modelagem da qualidade do ar, inventário de emissões atmosféricas, modelagem numérica hidrodinâmica, modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias.

**Fábio Luiz Partelli:** Foi agricultor até 18 anos. Engenheiro Agrônomo formado pela UFES. Mestrado e doutorado em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (Uenf), com parte do doutorado realizado em Portugal. Experiência na área de Fitotecnia e Melhoramento, com ênfase na cultura do café Conilon. É professor Associado da Ufes. Publicou 91 artigos científicos indexados na base Web Science, tendo h-index de 17 e h-index de 9, considerando os últimos cinco anos. Emite parecer Ad-hoc para Fundações e diversos periódicos nacionais e internacionais. Orientador de mestrado e doutorado no Programa de Pós-graduação em Agricultura Tropical e em Genética e Melhoramento. Foi coordenador do PPGAT/ (Ufes). Organizador geral do 1o ao 11o Simpósio do Produtor de Conilon. Atualmente é Diretor de Pesquisa da UFES, desde 2018, e bolsista Produtividade do CNPq, nível 1B.

**Ingrid Tonon Miranda:** Doutora em Alterações Climáticas e Políticas de Desenvolvimento Sustentável na Universidade Nova de Lisboa. Possui diplomas de Estudos Avançados em Geografia Física com ênfase em Dinâmica Fluvial e Sistema de Informação Geográfica e de Estudos Avançados em Alterações Climáticas e Políticas de Desenvolvimento Sustentável na Universidade de Lisboa. Possui Graduação em Tecnologia em Saneamento Ambiental pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo (Ifes) e Bacharelado em Geografia pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Possui habilidades e experiência nos tópicos: Ambiente, Geoprocessamento, Alterações Climáticas, Desenvolvimentos Sustentável, Resiliência, Inundações Urbanas.

**Kátia Cañellas:** Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com especialização em Paisagismo e Meio Ambiente pela Universidade Luterana do Brasil (Ulbra), mestrado em Arquitetura (Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo) pela UFRGS e Doutorado em Alterações Climáticas e Políticas de Desenvolvimento Sustentável pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (ULisboa). Atualmente está vinculada ao grupo de pesquisa Strategic approaches to ENvironment and Sustainability (Sensu) ligado ao Centro de Estudos em Gestão do Instituto Superior Técnico (CEG-IST, ULisboa), com investigações nas áreas de Inovação Social, Resiliência e Sustentabilidade.

**Madles Queiroz Martins:** Possui graduação em Agronomia mestrado em Produção Vegetal e doutorado em Genética e Melhoramento pelo Centro de Ciências Agrárias da Ufes. Sua tese de doutorado estudou efeito do aquecimento global sobre a cafeicultura. Atuou no ano de 2014-2015 como bolsista no Programa de Doutorado Sanduiche no Exterior, realizado no Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT), Lisboa - Portugal. Pós-doutorado pelo Instituto de Mudanças Climáticas (IEC-Ufes). Atua principalmente nos seguintes temas: Comportamento de plantas submetidas a alterações climáticas, armazenamento de sementes, germinação teste de vigor em sementes, casa de vegetação, nutrição de plantas, regulador de crescimento vegetal, produção de mudas, bioquímica e genética molecular em plantas.

**Marcos Góes Oliveira:** Biólogo formado pela Universidade Estadual de Pernambuco (UPE), mestre em Genética e Melhoramento de Plantas e Doutor em Produção Vegetal pela Uenf. Possui dois Pós-doutorados em agricultura Tropical pela (Ufes). Tem experiência na área de Biologia Geral e Engenharia Agrônômica, com ênfase em bioquímica, ecofisiologia, e fisiologia de Plantas, atuando principalmente em temas relacionados a sistemas agroflorestais, conservação pós-colheita de frutos, metabolismo mitocondrial e recuperação de áreas degradadas. Atualmente é pesquisador e professor de ensino superior e educação básica. Publicou diversos artigos científicos em periódicos nacionais e internacionais, além de autoria e coautoria de diversos capítulos de livros na área de fitotecnia e fisiologia vegetal.

**Wagner Rodrigues Soares:** Possui graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), mestrado em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Vicosa (UFV) e doutorado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente é pesquisador do Instituto de Estudos Climáticos do ES. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia, atuando principalmente nos seguintes temas: eventos climáticos e hidrológicos extremos na Amazônia, mudanças climáticas, modelagem climática, jato de baixo nível e transporte de umidade, Vulnerabilidades setoriais e avaliação de impactos de cenários climáticos.

**Wesley de Souza Campos Correa:** Possui graduação, mestrado e doutorado em Geografia pela Ufes. Atualmente é professor - Secretaria de Educação do Estado do Espírito Santo e pesquisador do Instituto de Estudos Climáticos do ES. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Climatologia Geográfica, atuando principalmente nos seguintes temas: climatologia, variabilidade climática, meteorologia sinótica, climatologia urbana, interpolação de dados, sensoriamento remoto (campo termal), modelagem matemática da atmosfera, series temporais, geografia física e meio ambiente.

<b>Título</b>	Mudanças Climáticas: Efeitos sobre o Espírito Santo
<b>Autores</b>	Neyval Costa Reis Junior Carlos Afonso Nobre Jane Meri Santos José Eduardo Macedo Pezzopane
<b>Assistência Editorial</b>	Andressa Marques Taís Rodrigues
<b>Capa</b>	Larissa Codogno
<b>Imagem da Capa</b>	“Chuva deu um tempo” de Marina Aguiar, CC BY 2.0, <a href="https://flic.kr/p/aZNTvc">https://flic.kr/p/aZNTvc</a>
<b>Projeto Gráfico</b>	Vinicius Torquato
<b>Preparação</b>	Giovana Bueno
<b>Revisão</b>	Márcia Santos
<b>Formato</b>	14x21
<b>Número de Páginas</b>	248
<b>Tipografia</b>	Adobe Garamond Pro
<b>Papel</b>	Alta Alvura Alcalino 75g/m <sup>2</sup>
<b>1ª Edição</b>	Setembro de 2023

---

Caro Leitor,  
Esperamos que esta obra tenha  
correspondido às suas expectativas.

Compartilhe conosco suas dúvidas e sugestões:

sac@editorialpaco.com.br

 11 98599-3876

---

## Publique sua obra pela Paco Editorial

EDIÇÃO DE QUALIDADE, DIVULGAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO NACIONAL



### Teses e dissertações

Trabalhos relevantes que representam contribuições significativas para suas áreas temáticas.



### Grupos de estudo

Resultados de estudos e discussões de grupos de pesquisas de todas as áreas temáticas.



### Capítulo de livro

Livros organizados pela editora dos quais o pesquisador participa com a publicação de capítulos.



### Técnicos e Profissionais

Livros para dar suporte à atuação de profissionais das mais diversas áreas.

Envie seu conteúdo para avaliação:

[livros@pacoeditorial.com.br](mailto:livros@pacoeditorial.com.br)

11 4521-6315

 11 95394-0872

[www.editorialpaco.com.br/publique-na-paco/](http://www.editorialpaco.com.br/publique-na-paco/)

**Todo mês novas chamadas são abertas:**

[www.editorialpaco.com.br/capitulo-de-livros/](http://www.editorialpaco.com.br/capitulo-de-livros/)

---

Conheça outros títulos em  
[www.pacolivros.com.br](http://www.pacolivros.com.br)

---

PACO  EDITORIAL

Av. Carlos Salles Block, 658  
Ed. Altos do Anhangabaú – 2º Andar, Sala 21  
Anhangabaú - Jundiaí-SP - 13208-100