

9. DESASTRES, IMPACTOS E VULNERABILIDADES RELACIONADOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

Osvaldo L. L. Moraes⁴⁸, Regina Alvalá⁴⁹, Pedro Camarinha⁴⁹, Ana Paula Cunha⁴⁹, Silvia Saito⁴⁹, Marcelo Seluchi⁴⁹, Rachel Trajber⁴⁹

INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório mais recente do IPCC sobre mudança do clima, em especial sobre impactos, adaptação e vulnerabilidade (IPCC 2021), os desastres provocados pelas mudanças climáticas já são mais frequentes e intensos do que previstos pelos cientistas. Logo, o risco de desastres pode continuar a aumentar, mesmo que as nações consigam limitar as emissões de gases de efeito estufa que impulsionam o aquecimento global. Ainda que o aqui destacado explice diretamente causas e efeitos, faz-se necessário uma abordagem mais aprofundada, particularmente para o Brasil, o que é priorizado neste Capítulo.

Prevê-se que as mudanças climáticas tenham uma série de consequências graves, algumas das quais terão impactos em longo prazo, como a propagação de doenças e a elevação do nível do mar, enquanto outras terão impactos mais imediatos, como chuvas intensas, inundações, deslizamentos de terra. Embora reconhecendo a importância das

⁴⁸ Departamento para o Clima e Sustentabilidade, MCTI, Brasília, DF.

⁴⁹ Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, CEMADEN, São José dos Campos, SP.

Autor correspondente: osvaldo.moraes@gmail.com

outras consequências previstas das mudanças climáticas, neste capítulo visou-se abordar os “eventos climáticos extremos” responsáveis por desastres geo-hidro-climáticos.

A série de eventos climáticos extremos registrados no Brasil nos últimos anos têm demandado esforços dos setores científico-acadêmicos com vistas à aprofundar e acelerar o *nexus* entre mudanças climáticas e desastres. Não obstante, as mudanças climáticas e seus impactos são questões científicas de grande complexidade, portanto, não há respostas simples para essa conexão. Entender o que a ciência pode estabelecer é cada vez mais relevante, especialmente para subsidiar decisões políticas.

Com foco inicial sobre as ameaças da natureza e suas inerentes complexidades, diversas linhas de evidências têm sido reunidas para criar um panorama da influência das mudanças climáticas nos eventos climáticos extremos (Drexler and Meisenzahl, 2024). Por exemplo, para ondas de calor e chuvas intensas, a influência já é clara. Em outros casos, como furacões, as evidências estão apenas começando a surgir; em outros casos, ainda não há indicações claras. No entanto, em todos os casos, a tendência para o futuro é preocupante: a partir de modelagem tem-se indicado que, a menos que medidas sérias sejam tomadas, o aquecimento global atingirá níveis nos quais vários tipos de eventos extremos são muito mais prováveis. Mas, seguindo o rigor científico o que não se pode afirmar, e talvez nunca se possa, é que qualquer evento específico possa ser atribuído diretamente às mudanças climáticas. Embora um evento específico possa ser mais provável em decorrência das mudanças climáticas, sempre haverá a possibilidade de que ele tenha ocorrido em circunstâncias inalteradas, dada a não linearidade do sistema climático. Qualquer evidência científica da relação entre desastres relacionados ao clima e mudanças climáticas terá, portanto, de se correlacionar com tendências estatisticamente significativas, e não a incidentes específicos. Deve-se, por critérios científicos,ressaltar que algumas tendências em condições climáticas severas parecem mais bem identificadas do que outras; no entanto, as principais barreiras à criteriosa compreensão são, em primeiro lugar, as estatísticas – a capacidade de identificar o sinal a partir do ruído da variação natural – e, em segundo lugar, o período limitado (no contexto temporal) em que o aquecimento vem ocorrendo. Cenários oriundos de modelagem que levam em conta novas emissões de gases de efeito estufa e, consequentemente, o aquecimento global indicam que, infelizmente, o sinal se tornará muito mais claro no futuro (Hamdan et al. 2023).

Contudo, a atribuição de causas entre mudanças climáticas e eventos extremos é apenas um dos elos entre mudanças climáticas e desastres. Um ano com “n” eventos extremos a mais do que a média pode ser muito menos impactante do que outro ano com “n” eventos extremos a menos do que a média. Em outras palavras, além do elemento de acaso no impacto do aumento de eventos climáticos extremos, é fundamental considerar que algumas áreas também são mais vulneráveis a danos, como ecossistemas frágeis ou áreas urbanizadas em planícies de inundação. Um evento extremo pode culminar em um desastre quando áreas vulneráveis são afetadas.

As mudanças climáticas certamente moldam os eventos climáticos. No entanto, descrever o clima e o tempo como causas dos desastres pode ser equivocado, uma vez que os desastres são causados pela combinação entre ameaças da natureza e as vulnerabilidades associadas às ações antrópicas. Assim, é necessário cautela em associar causas de eventos climáticos extremos e os desastres associados. Mesmo quando a ciência consegue, com rigor, atribuir tais eventos às mudanças climáticas, os danos resultantes são essencialmente decorrentes das vulnerabilidades existentes combinadas com as ameaças que deflagraram os eventos geo-hidrológicos.

As pessoas entendem que os danos que sofrem são devidos às suas vulnerabilidades. Como ressaltado por Wisner et al. (2004), não há crise sem vulnerabilidade. Um evento extremo pode não causar danos em comunidades bem preparadas. No entanto, uma comunidade vulnerável pode sofrer danos ainda que o evento extremo não seja tão extremo assim. De modo similar, os impactos podem se expandir e ampliar em uma relação direta com a intensidade da ameaça natural. Uma comunidade pode inferir os danos às suas vulnerabilidades, mesmo que o evento climático desencadeador tenha uma assinatura evidente de mudança climática (Ribot et al., 2020). Em outras palavras, atribuir o desastre apenas a um evento climático é, portanto, inadequado. Por outro lado, atribuir desastres apenas às vulnerabilidades reduz a importância do outro fator que o desencadeia e, particularmente, dos eventos climáticos induzidos ou agravados pelas emissões de gases de efeito estufa (Moraes 2023a). Ou seja, é cientificamente desafiador colocar em um mesmo cenário as causas locais (vulnerabilidades) com a causa global (o aumento das concentrações de gases de efeito estufa).

Conforme ressaltado, relacionar os desastres que vem sendo registrados diretamente como resultantes das mudanças climáticas pode não ser completamente apropriado. Logo, para a adequada avaliação, busca-se a correlação considerando-se o cruzamento de dados entre a tendência dos eventos extremos e a tendência no número de desastres, o que requer não apenas dados confiáveis, mas, também, um conjunto de dados amostral significativo para que as análises estatísticas possam ser representativas (Moraes e Lacerda, 2024).

Dados podem ser definidos como fatos que podem ser armazenados e investigados (Hackman et al. 2024). Frequentemente usado como sinônimo de informação, ressalta-se que há uma diferença sutil entre os dois. O termo dados refere-se aos detalhes brutos dos quais a informação é posteriormente derivada. Embora as definições de dados pareçam claras, referindo-se a fatos, números ou observações, também é evidente que, quando se trata do conteúdo dos dados, não há homogeneidade, causando confusão fácil em relação às maneiras como os dados são tratados, interpretados e apresentados.

A contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2021) incluiu uma análise da realidade das mudanças climáticas. Conforme este relatório “*agora temos uma visão muito mais clara do clima passado, presente e do possível futuro, e essas informações são essenciais para entender para onde estamos caminhando, o que pode ser feito e as múltiplas facetas de um clima em mudança para o qual precisamos nos preparar, em todas as regiões*”. As conclusões do Grupo de Trabalho I foram baseadas na integração de múltiplas linhas de evidências, incluindo observações *in situ* e remotas, informações paleoclimáticas, modelagem climática global e regional, bem como avanços nos métodos de análises e insight (percepções) do crescente campo dos serviços climáticos.

Do ponto de vista pragmático, para concluir que o clima mudou, é necessário averiguar que houve uma mudança perceptível no padrão de variação de longo prazo da variabilidade climática. Os relatórios V e VI do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), publicados em 2014 e 2023, respectivamente, mostram as evidências de variações, estatisticamente significativas, no estado médio do clima de longo prazo.

Para os propósitos pretendidos no presente Capítulo, isto é, entender a relação entre as mudanças climáticas e desastres, ilustramos com o indicador **Rx1day** o aumento das precipitações no Brasil. O **Rx1day** é

calculado considerando-se a precipitação máxima diária (em mm) durante um período de interesse. Na Figura 1 ilustra-se a variação da média anual, calculada para intervalos decadais, do **Rx1day**. As figuras centrais representam a diferença, deste índice, entre as décadas. Uma inspeção simples do mapa de “anomalias” entre as décadas 2011-2020 e 2001-2010 mostra que as precipitações diárias médias foram, majoritariamente, positivas. Certamente esse exemplo tem que ser considerado, também, com cuidado. Do ponto de vista meteorológico, as principais questões na adoção de um índice estão relacionadas à definição de eventos extremos, às mudanças em sua distribuição e sua intensidade (Gimeno et al., 2022). Pandergas (2028) destaca as muitas maneiras para definir precipitação extrema, assim como a escolha da definição afeta a resposta ao aquecimento global. Conforme esta autora, os pesquisadores devem escolher sua definição de precipitação extrema com cuidado e articulá-la claramente, assim como os usuários devem considerar como a precipitação extrema é definida ao interpretar análises de sua mudança com o aquecimento.

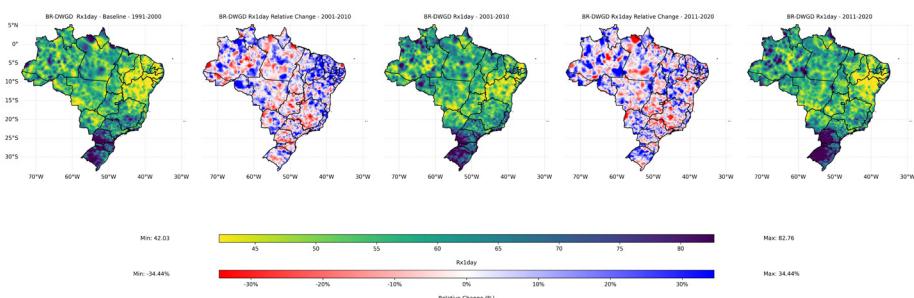


Figura 1: índice Rx1day.. Maximá precipitação diárias (em mm) nas três últimas décadas. As figuras intermediárias é a diferença entre décadas.

Embora no bojo de definição, do ponto de vista meteorológico, do que seja um vento extremo, não resta dúvida de que há critérios objetivos para estabelecer os diversos índices disponíveis. Contudo, para desastres, não há tal equivalência.

Osuteye et al. (2017) avaliaram as limitações e gargalos dos bancos de dados disponíveis. A ocorrência de desastres tem sido cada vez mais documentada e contabilizada em bancos de dados internacionais sobre desastres. O site da Plataforma Global de Informações sobre Riscos

(GRIP) do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) disponibiliza uma lista abrangente de bancos de dados sobre desastres classificados como globais, regionais ou nacionais. Este site referencia a disponibilidade de quatro bancos de dados globais sobre desastres: EM-DAT, Número de Identificação Global de Desastres (GLIDE), Projeto de Banco de Dados de Desastres da Universidade de Richmond e NatCatService. Além disso, o Observatório de Inundações de Dartmouth conta com um arquivo com mais de 4.000 grandes eventos de inundação, que podem ser pesquisados por país. Outro banco de dados é o DesInventar, o qual é um catálogo de dados nacionais, que atualmente inclui 89 países e está crescendo em escopo.

Os bancos de dados têm diferentes limites sobre o que consideram ser um evento de desastre. No EM-DAT, para que um evento de desastre seja registrado, ele deve atender a um dos seguintes critérios: ter 10 ou mais mortes, 100 ou mais pessoas afetadas/feridas/desabrigadas, ou declaração do país de estado de emergência e/ou um apelo por assistência internacional (Moraes, 2023b). Enquanto a definição para o banco de dados DesInventar considera uma (1) ou mais perdas humanas ou US\$ 1 ou mais em perdas econômicas. O DesInventar considera como fontes de informações jornais nacionais e locais, relatórios policiais e de saúde pública e inclui como um evento de desastre ocorrências em que houve qualquer tipo de perda humana ou econômica. O EM-DAT é compilado de várias fontes, incluindo a ONU, agências governamentais e não governamentais, companhias de seguros, institutos de pesquisa e agências de notícias, e tem uma ampla gama de outras fontes. Portanto, esses dois bancos de dados podem retratar imagens bastante diferentes de perdas por desastres em um país.

No Brasil, a plataforma oficial de registro de desastres é o S2iD (<https://s2id.mi.gov.br/>). Nesta plataforma são inseridos os registros de desastres e a análise do reconhecimento federal da situação de emergência ou de estado de calamidade pública. No S2iD, o município deve registrar a ocorrência dos eventos e solicitar recursos federais para as ações locais de assistência humanitária e restabelecimento de serviços essenciais quando da ocorrência de desastres. O sistema classifica os desastres em dois grandes grupos: naturais e tecnológicos. O cluster referente aos desastres naturais contêm os chamados hidrológicos, que abrange as inundações, enxurradas e alagamentos; os meteorológicos, que contemplam os ciclones, frentes frias, zonas de convergência, tempestades e tempera-

turas extremas; os climatológicos, que incorpora a seca, estiagem, incêndios florestais e baixa umidade do ar; os geológicos, que compreendem os terremotos, movimentos de massa e erosão. E, finalmente, os biológicos, englobando as doenças infecciosas virais, bacterianas, parasíticas, fúngicas e infestações/pragas de animais, de algas e outros tipos. O S2iD registra desastres desde 1991.

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres (ref), que compila os dados do S2iD, entre 1991 e 2020, o Brasil teve 23923 desastres reconhecidos. Ou seja, 23923 decretos municipais de estado de calamidade ou situação de emergência foram reconhecidos. Estes desastres contabilizaram 2297 mortes, afetaram mais de 77 milhões de pessoas e um impacto econômico superior a 300 bilhões de reais. Essa distribuição pode ser detalhada por tipologias e por décadas. Para efeitos de comparação com a figura acima, consideramos os desastres hidrológicos, meteorológicos e geológicos, particularmente os movimentos de massa. Nestes casos, o Atlas contabiliza 8998 desastres que causaram 2153 mortes, que corresponde a 93% das mortes totais, afetaram 51 milhões de pessoas (66% do total) e perdas econômicas superiores a 100 bilhões de reais (aproximadamente 33% do total). Chama a atenção, contudo, que nenhum decreto municipal foi reconhecido antes de 2003.

A Figura 2 apresenta o total decenal de desastres hidrometeorológicos reconhecidos, por região, para as décadas de 2001-2010 e 2011-2020. Na década de 1991-2000 não houve, conforme o S2iD, nenhum reconhecimento de decreto municipal de calamidade pública ou situação de emergência (aqui deve entrar um frase explicativa). Assim, conforme ressaltado, é necessário cautela para atribuir às mudanças climáticas o aumento no número de desastres observados, principalmente por que, conforme o S2iD, na região Nordeste o número de desastres na década de 2011-2020 foi inferior ao número de desastres reconhecidos na década de 2001-2010. Não obstante, o S2iD cumpre o seu propósito, que é de integração de diversos produtos da defesa civil nacional e de qualificar e dar transparência à gestão de riscos e desastres no Brasil. Por outro lado, essa plataforma passou por reestruturações ao longo dos anos, o que significa que a metodologia para reconhecer os decretos municipais alterou-se com o tempo. Ou seja, não se pode, com rigor científico atestar que os números apresentados nessa figura representam os desastres que, efetivamente, ocorreram no país. Apesar de tais limitações na fonte de dados de desastres não resta dúvida, também, que os desastres causados por

eventos extremos de clima são os responsáveis pela quase totalidade de fatalidades e pela maioria no número de pessoas afetadas.

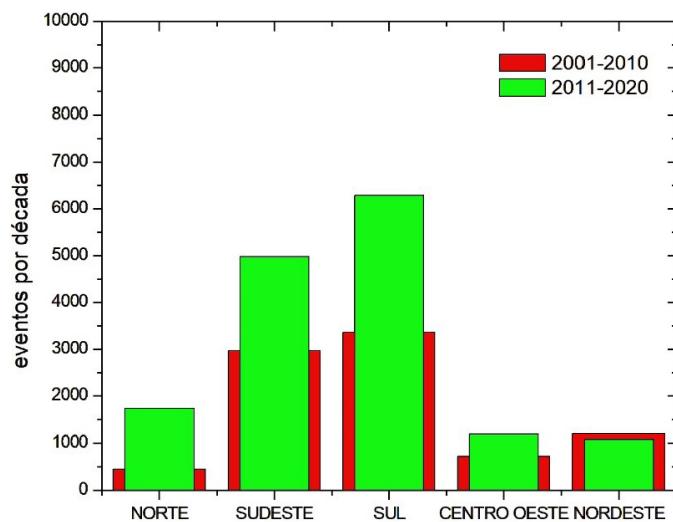


Figura 2: Desastres, por década e por região, no Brasil (fonte: S2iD)

Considerando as especificidades destacadas e as limitações de fontes de dados, avaliar o que se conhece sobre as mudanças climáticas e desastres decorrentes no Brasil é objetivo do presente Capítulo. Portanto, são destacados neste Capítulo (i) o panorama nacional dos desastres geohidrometeorológicos no Brasil; (ii) secas e seus impactos nos diferentes biomas; (iii) os avanços e desafios para a redução de vulnerabilidades a desastres no país; (iv) educação e Redução de Riscos de Desastres com Justiça Climática.

DESASTRES GEO-HIDROMETEOROLÓGICOS

Introdução conceitual e marco científico

O termo “geo-hidrometeorológico” utilizado neste Capítulo é formado pela união de três elementos que representam os domínios naturais dos fenômenos naturais que podem originar os desastres tratados neste tópico:

- Geo-, derivado de “geológico” (do grego gê, “Terra”), referindo-se a processos relacionados ao solo, rochas, relevo e movimentos gravitacionais de massa (ex.: deslizamentos, escorregamentos).
- Hidro-, derivado de hidrológico (do grego hydor, “água”), relacionando à dinâmica da água em superfície ou subsolo (ex.: enchentes, inundações, enxurradas).
- Meteorológico, referente a processos atmosféricos que atuam como gatilhos ou condicionantes dos fenômenos acima, especialmente as chuvas.

Assim, o termo busca integrar, de forma sintética, a natureza multi-causal e interdependente desses eventos, que não pertencem exclusivamente a um único domínio físico, mas resultam da interação entre condições geológicas, hidrológicas e meteorológicas. No contexto brasileiro, a definição utilizada neste Capítulo inclui eventos como inundações, alagamentos, enxurradas, deslizamentos de terra e outros movimentos de massa deflagrados por chuvas intensas e/ou volumosas.

Ao contrário da ideia de que se trata de ocorrências puramente naturais, é importante compreender que o caráter catastrófico que estes eventos podem atingir depende, fundamentalmente, das vulnerabilidades humanas e territoriais envolvidas. Assim, ainda que o excesso de chuva seja o fator desencadeante tratado neste Capítulo, os danos e prejuízos são amplificados por processos antrópicos, como a urbanização desordenada, a ocupação de encostas e margens de rios, deficiências na infraestrutura urbana, precariedade habitacional e ausência de políticas eficazes de planejamento e gestão do território. Portanto, este tópico analisa os desastres de origem geo-hidrometeorológica e como se manifestam no território brasileiro, destacando suas particularidades e principais condicionantes perante a diversidade regional do país, sob a luz das evidências científicas que ajudam a compreender o que transforma um evento natural e um desastre socioambiental.

Panorama nacional e evidências observacionais

Entre 1991 e 2024, os desastres geo-hidrometeorológicos corresponderam a pouco mais de um terço (38,5%) de todos os eventos regis-

dos no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD)⁵⁰. Apesar de não constituírem a maioria absoluta dos registros, esses eventos foram responsáveis pela maior parte dos impactos humanos no período, concentrando 83,5% das mortes notificadas (4.549 de um total de 5.448) e 91% das pessoas desalojadas e desabrigadas (9,81 milhões em um total de 10,77 milhões). Esses números evidenciam que, embora relativamente menos frequentes do que outras tipologias de desastres, como as secas, os desastres geo-hidrometeorológicos se destacam pela magnitude das consequências sociais e humanitárias que provocam, muitas vezes de forma intensiva.

Os dados mencionados anteriormente revelam o alto potencial de letalidade e destruição desses eventos, sobretudo quando atingem áreas urbanas caracterizadas por múltiplas dimensões de vulnerabilidade, como a fragilidade e insuficiência das infraestruturas, a ocupação irregular em encostas e áreas de várzea, em grande parte decorrente da ausência de planejamento territorial e propulsoradas pela grande desigualdade social. Os desastres de origem geológica, em que se destacam os deslizamentos de terra são exemplo emblemático: bem menos frequentes que outros tipos de desastres, figuram entre os mais letais, em especial quando ocorrem em áreas densamente povoadas em encostas suscetíveis ou em suas proximidades imediatas. A tragédia de Petrópolis, em 15 de fevereiro de 2022, ilustra bem essa dinâmica: um episódio de chuva extrema, altamente concentrada no tempo e no espaço, desencadeou 269 deslizamentos de terra (Alcântara et al., 2023), mas um único grande deslizamento no Morro da Oficina destruiu dezenas de residências e foi responsável pela maior parte das 231 mortes registradas neste evento.

Por outro lado, os desastres de origem hidrológica, como inundações, enxurradas e alagamentos, apresentam elevada recorrência, com 13.324 registros (28,7% de todos os desastres reportados ao S2iD entre

50 As informações do S2iD foram acessadas por meio do Atlas Digital de Desastres, considerando, para este tópico, os registros classificados como “hidrológicos”. Essa categoria reúne ocorrências reportadas como alagamentos, enxurradas, inundações, movimentos de massa e chuvas intensas. Cabe destacar que “chuvas intensas” não configuram, no sentido estrito, uma ameaça independente, pois atuam como fator desencadeante dos demais fenômenos mencionados. Pode-se dizer que a presença dessa classificação nos registros oficiais sugere a ocorrência de desastres complexos em que várias tipologias de ameaças naturais ocorreram ao mesmo tempo, ou reflete a incerteza do agente declaratório quanto à caracterização do evento.

2001-2020), afetando praticamente todos os municípios brasileiros em alguma magnitude. Esses eventos são os principais responsáveis por desalojar e desabrigar as populações atingidas, provocando também impactos significativos sobre a infraestrutura urbana, mobilidade, saúde pública e a economia local. Tomando apenas as inundações como exemplo, elas representam 10% de todos os desastres registrados no S2iD no mesmo período (4.822 de um total de 46.423), mas foram responsáveis por 45,2% de todas as pessoas desalojadas e desabrigadas (3,28 milhões de um total de 7,25 milhões), além de terem causado 23% dos prejuízos materiais totais (R\$ 24,8 bilhões de um total de R\$ 107,8 bilhões), considerando perdas públicas e privadas. Esses números destacam que, mesmo quando não resultam em óbitos, os eventos hidrológicos têm um efeito devastador sobre as condições de vida das populações afetadas.

Após esta primeira contextualização dos tipos de desastres geo-hidrometeorológicos que ocorrem no Brasil, é mandatório compreender que a frequência e a gravidade destes desastres apresentam forte desigualdade territorial, seja em termos de quantidade ou impactos acumulados ao longo do tempo, com concentração mais expressiva na porção leste das regiões Sudeste, Sul e Nordeste. Uma análise superficial poderia sugerir que a explicação para essa concentração se limita às condições climáticas dessas regiões, caracterizadas por maior ocorrência de chuvas intensas e volumosas em determinados períodos do ano, especialmente pela proximidade do Oceano Atlântico e por serem regiões de passagens de frentes frias que se chocam com grandes massas de ar quente. Embora o fator climático seja parte do problema, ele não é suficiente para explicar a distribuição espacial destes desastres. Ao analisar municípios muito próximos e com clima praticamente idênticos, observa-se que nem todos possuem histórico expressivo de desastres. A presença de elementos físicos, como relevo acidentado ou extensas planícies inundáveis, tampouco oferece uma explicação completa, já que existem áreas com essas características que também apresentam menor incidência de desastres historicamente.

Portanto, é na análise em escala local que se revelam os elementos decisivos para a ocorrência e a magnitude dos desastres, frutos da combinação entre ameaças naturais e vulnerabilidades sociais e estruturais. O crescimento urbano desordenado, a impermeabilização extensiva do solo, a ocupação de “áreas de risco” sem infraestrutura adequada de drenagem ou de contenção e a carência de políticas habitacionais e de

prevenção são fatores determinantes para transformar um evento natural extremo em um desastre de grandes proporções. Neste sentido, os próximos tópicos desta sessão buscarão detalhar as principais características explicativas para compreender os principais *hotspots* de desastres geo-hidrometeorológicos no Brasil, destacando o papel das vulnerabilidades como elemento central na produção do risco.

Cenários de risco regionais dos desastres geo-hidrometeorológicos no Brasil

O risco de desastres geo-hidrometeorológicos no Brasil apresenta significativa variabilidade regional, condicionada por fatores climáticos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e, principalmente, socioespaciais. A seguir, são destacados os principais cenários de risco por região e por tipologia de desastre, bem como as evidências sobre os efeitos das mudanças climáticas.

Região Sudeste: aprofundamento conceitual e metodológico para elucidar a complexidades do risco de desastres geo-hidrometeorológicos

A Região Sudeste concentra aproximadamente 40% da população brasileira e registra o maior número de desastres geo-hidrometeorológicos do país (Avila et al., 2016; Saito et al., 2018) com predominância de deslizamentos de terra e enxurradas como os mais destrutivos e letais. Em razão dessa relevância, os cenários de risco nesta região serão analisados de forma mais aprofundada. Embora haja especificidades nos fatores condicionantes e desencadeadores dos desastres geo-hidrometeorológicos nesta região, as reflexões e análises desenvolvidas para o Sudeste constituem referência conceitual e metodológica para o entendimento das demais, cuja caracterização será apresentada de forma sintética.

O crescimento urbano acelerado e, em grande parte, desordenado, associado à ausência ou insuficiência de planejamento territorial, resultou na expansão de muitos assentamentos precários em áreas de alta suscetibilidade geo-hidrometeorológica (Alves et al., 2023; Hirye et al. 2023). Nesses locais, a impermeabilização extensa do solo e a deficiência dos sistemas de micro e macrodrenagem comprometem a infiltração e o escoamento das águas pluviais (Altafini et al., 2023). Isso provoca

acúmulo e concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais que, ao atingir encostas íngremes, promovem sua instabilidade e podem desencadear deslizamentos de terra, especialmente em solos coluvionares típicos dos domínios da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira (Oliveira et al., 2021; Vieira et al., 2016). Esses mesmos fatores (impermeabilização excessiva, drenagem precária e relevo acidentado) também favorecem a ocorrência de enxurradas intensas, particularmente em áreas urbanas densamente ocupadas. Nessas condições, o fluxo descontrolado da água provoca danos rápidos e localizados, muitas vezes ocorrendo de forma simultânea aos deslizamentos, o que amplifica significativamente os impactos dos eventos.

Cidades situadas em terrenos acidentados dessas cadeias montanhosas e de áreas serranas adjacentes, como Petrópolis (RJ), Angra dos Reis (RJ), Santos (SP), Campos do Jordão (SP) e diversos municípios da Zona da Mata Mineira e da Zona Serrana do Espírito Santo, apresentam elevado risco geo-hidrometeorológico, comprovado por seus históricos de grandes desastres (Bonini et al., 2021; Alcântara et al., 2023; Souza et al., 2023). Além disso, o Sudeste se destaca pelas regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro, Vitória e Belo Horizonte que enfrentam riscos agravados pelo adensamento populacional que aumenta a exposição humana em áreas de risco (Saito et al., 2018), sobretudo em decorrência das desigualdades socioespaciais e da ocupação de áreas suscetíveis, que ocorre majoritariamente por comunidades vulneráveis. Alterações antrópicas, como cortes irregulares de encostas, aterros mal executados e o lançamento de esgoto ou águas pluviais em áreas de declive e canais naturais, aumentam substancialmente a vulnerabilidade ambiental e, por consequência, o risco de desastres.

Do ponto de vista climático, os principais mecanismos associados às chuvas intensas no Sudeste incluem sistemas convectivos de mesoescala (Siqueira & Marques, 2016), frentes frias, o efeito orográfico das montanhas costeiras, jatos de baixos níveis (Santana et al., 2013) e o transporte de umidade amazônica. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) constitui o segundo sistema mais importante, responsável por 47% dos episódios de precipitação intensa no verão austral na região, sendo superada apenas pelas frentes frias (53%) (Lima et al., 2010). Segundo estudos conduzidos por Aguiar e Cataldi (2021), a probabilidade média de ocorrência de desastres, dada a presença da ZCAS no Sudeste brasileiro, é de 24%, enquanto a probabilidade condicional de ocorrência da ZCAS,

dado um desastre no Sudeste, é de 48%, em que se enquadra o grande desastre da Região Serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, quando as chuvas intensas foram geradas pelo deslocamento de uma frente fria que se acoplou à Zona de Convergência de Umidade, organizando a ZCAS (Aires et al., 2020).

Em muitos casos, a combinação dos diferentes sistemas e fatores climáticos previamente mencionados pode ocorrer simultaneamente e estabelecer cenários ainda mais extremos, como o desastre ocorrido em São Sebastião em fevereiro de 2023, quando a convergência de uma intensa frente fria, área de baixa pressão, aporte de umidade oceânica intensificado pelo aquecimento do mar e o efeito orográfico da Serra do Mar culminaram na chuva mais volumosa registrada no Brasil em apenas 12 horas, com acumulado de 683 mm que causaram deslizamentos generalizados e levaram 64 pessoas a óbito (G1, 2023; Marengo et al. 2024).

Este último desastre acima mencionado, em particular, sintetiza de forma clara a principal mensagem que se deseja destacar neste tópico. Embora o evento extremo meteorológico que culminou no desastre em São Sebastião tenha registrado seu maior índice pluviométrico no município vizinho de Bertioga, os impactos neste último município foram de menor magnitude e não resultaram em óbitos. Pode-se dizer que volumes extremos de precipitação atingiram toda a faixa litorânea entre os dois municípios (superiores à 500 mm); contudo, os impactos mais severos concentraram-se em bairros específicos de São Sebastião, especialmente na Vila do Sahy. Nessa localidade, vulnerabilidades socioambientais preexistentes e elevado grau de exposição potencializaram as consequências do evento.

Na costa norte de Bertioga, predominam condomínios de médio e alto padrão, implantados majoritariamente em planícies costeiras com boa drenagem natural e infraestrutura adequada. Já na costa sul de São Sebastião observa-se um contraste marcante: enquanto as áreas litorâneas mais valorizadas, com menor suscetibilidade a desastres, são ocupadas por residências e condomínios de alto padrão e beneficiadas por melhor infraestrutura nos seus entornos, o setor situado do outro lado da rodovia BR-101 abriga comunidades mais vulneráveis, com infraestrutura deficiente e localizadas em áreas de alta suscetibilidade a deslizamentos de terra, enxurradas, alagamentos e inundações de pequenos cursos d'água. Ainda sobre este desastre, fica uma última reflexão: Bastos Moroz & Thieken (2024) mostram que a ocupação/exposição urbana ocorrida

nas últimas duas décadas explica, pelo menos, 46% dos danos físicos e humanos ocorridos em São Sebastião, os quais poderiam ter sido evitados por políticas de ordenamento territorial e contenção da expansão urbana em áreas suscetíveis.

Em síntese, ressaltam-se novamente: eventos extremos de precipitação não são, por si só, os principais responsáveis pelos desastres geo-hidrometeorológicos. Embora funcionem como gatilhos dos fenômenos geo-hidrometeorológicos, os desastres resultam de um processo histórico de construção do risco, condicionado por desigualdades socioeconômicas, degradação ambiental e padrões de ocupação do território. Assim, quando esses eventos ocorrem, apenas evidenciam e amplificam vulnerabilidades e problemas estruturais preexistentes, convertendo os riscos em impactos concretos. Essa constatação torna-se ainda mais preocupante diante das evidências de aumento na frequência e intensidade desses eventos nas últimas décadas, associadas às mudanças climáticas e à variabilidade natural do clima (IPCC, 2022; Marengo et al., 2020), que trataremos adiante, e que podem se materializar em impactos de grandes proporções se ações de redução do risco de desastres (RRD) e adaptação não forem adotadas urgentemente.

Mudanças Climáticas e desastres geo-hidrometeorológicos no Sudeste

Antes de abordar diretamente sobre as mudanças climáticas, faz-se premente esclarecer que a relação entre o aquecimento global e a intensificação das chuvas extremas está fundamentada em um princípio termodinâmico amplamente reconhecido, descrito pela relação de Clausius-Clapeyron. De forma simplificada, esse princípio estabelece que, para cada aumento de aproximadamente 1°C na temperatura do ar, a capacidade da atmosfera de reter vapor d'água cresce em torno de 7% (Trenberth et al., 2003; Allan & Soden, 2008). Esse acréscimo na capacidade de armazenamento de umidade implica que, em um clima mais quente, a atmosfera dispõe de maior quantidade de “combustível” para a formação de nuvens profundas e sistemas precipitantes. No entanto essa umidade extra não se traduz necessariamente em mais dias de chuva ao longo do ano, mas sim em eventos de chuva mais concentrados e intensos (Donat et al., 2016; Pendergrass & Knutti, 2018). É exatamente essa característica que eleva o risco de desastres geo-hidrometeorológicos.

Sobre este aspecto, há evidências robustas demonstrando que eventos de precipitação extrema estão se intensificando no Sudeste brasileiro, compatíveis com o aquecimento planetário observado no mesmo período, onde se destaca a tendência de aumento da precipitação máxima diária e de dias extremamente úmidos, particularmente no estado do Rio de Janeiro, onde a média dos eventos extremos diários aumentou até 5 mm/década (Luiz-Silva & Oscar-Júnior, 2022). Com base nos resultados recentes de Orlandi Simões et al. (2025), algumas áreas do Sudeste também apresentam sinais consistentes de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, especialmente durante o verão, implicando na redução no tempo de retorno estimado, como porções do Espírito Santo, do sul-central do Rio de Janeiro (incluindo a Região Serrana) e de áreas localizadas no norte e centro de Minas Gerais, onde as tendências positivas nos índices de extremos pluviométricos sugerem maior probabilidade de ocorrência de episódios severos no futuro próximo. Nesta mesma linha, o estudo conduzido por Ávila et al. (2016) avaliou dados observados entre 1978-2014 e evidenciou tendências estaticamente significativas do aumento de eventos extremos de chuva nos domínios da Serra do Mar no estado do Rio de Janeiro.

Há de se ressaltar que, além destas tendências já evidenciadas no passado, estudos recentes, utilizando dados de modelagem climática e análise de risco, indicam que o Sudeste brasileiro poderá ser ainda mais impactado por eventos de origem geo-hidrometeorológica em decorrência da continuidade do aquecimento global. Nestes estudos, é praticamente consenso a tendência de aumento da frequência e magnitude dos eventos de chuvas extremas concentrados em 1 e 5 dias (Camarinha, 2016; Debortoli et al., 2016; Luiz-Silva & Oscar-Júnior, 2022; Santos, 2022); especialmente em cenários em que o aquecimento global supere 2°C (Marengo et al., 2021; Debortoli et al. 2016; Brasil, 2016; Marengo et al., 2021; Santos, 2022; Brasil, 2020).

Apesar das evidências anteriormente apresentadas, seja para o Sudeste brasileiro ou qualquer outra região, ainda há debate sobre o papel específico das mudanças climáticas antropogênicas na ocorrência de eventos individuais, dada a complexidade de isolar a contribuição antrópica frente à variabilidade natural e a outros fatores meteorológicos regionais ou locais (Stott et al., 2016). Neste sentido, os “estudos de atribuição” têm se consolidado como ferramenta fundamental para reduzir essas incertezas, comparando, por meio de modelagem climática, a pro-

babilidade ou intensidade de um evento no clima atual (com o forçamento radiativo induzido por atividades humanas, especificamente as emissões de gases de efeito estufa) e em um cenário contrafactual sem esse forçamento (Vincent et al., 2020). Embora a atribuição de causalidade absoluta a um evento individual seja inviável, essa abordagem permite estimar como o aquecimento global altera a probabilidade e severidade de extremos (World Weather Attribution, 2023), fornecendo subsídios essenciais para avaliar a amplificação de impactos e orientar políticas de adaptação e gestão de riscos.

Para concluir esta seção, com o Sudeste brasileiro tendo sido priorizado como estudo de caso e seguirmos para análises sucintas das demais regiões, apresentam-se evidências científicas recentes que elucidam a relação entre mudanças climáticas e desastres geo-hidrometeorológicos de grande impacto. Um exemplo emblemático é o evento extremo ocorrido em Minas Gerais, em janeiro de 2020, caracterizado por precipitações recordes que resultaram em 56 óbitos e prejuízos estimados em R\$ 1,3 bilhão. Segundo análise de atribuição conduzida por Dalagnol (2021), aproximadamente 41% desses impactos podem ser associados ao aquecimento global induzido por atividades humanas, evidenciando a influência antrópica na intensificação de extremos pluviométricos e na amplificação de suas consequências socioeconômicas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2023) no estudo do desastre ocorrido na Baixada Santista (SP), em março de 2020, desencadeado por acumulados pluviométricos de até 350 mm em 48 horas, volumes suficientes para deflagrar enxurradas, alagamentos e, principalmente, deslizamentos de terra generalizados que ocasionaram 44 mortes, afetaram cerca de 2.800 pessoas e geraram prejuízos superiores a US\$ 43 milhões. As análises de atribuição indicaram que, no contexto dos atuais níveis de aquecimento, chuvas dessa magnitude tornaram-se 46% mais prováveis, e que entre 20% e 42% dos impactos observados podem ser atribuídos às mudanças climáticas antropogênicas.

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Sul e mudanças climáticas associadas

A Região Sul do Brasil, caracterizada por seu clima subtropical e topografia diversificada, tem experimentado uma intensificação significativa de eventos extremos nas últimas décadas, com destaque os grandes

desastres ocorridos no Vale do Itajaí (2008) e no Rio Grande do Sul em 2023 (Alvalá et al., 2024) e, especialmente, abril-maio de 2024, considerado o desastre mais devastador enfrentado pela região, que afetou mais de 2.3 milhões de pessoas e resultando em 184 mortes e 42 desaparecidos (Reboita et al., 2024; Marengo et al., 2024). Este tópico examina os padrões de inundações, deslizamentos e suas relações com fatores ambientais, socioespaciais e com as mudanças climáticas, fornecendo uma base científica fundamentada para compreender a relação destes fenômenos com as ocorrências de desastres, especialmente nas últimas décadas.

A Região Sul do Brasil apresenta características geomorfológicas intrínsecas que amplificam significativamente a exposição a desastres relacionados ao clima por ser uma região bastante povoada. O relevo acidentado, caracterizado por planícies aluviais extensas intercaladas com áreas de planalto e serras, cria condições naturais propícias tanto para inundações quanto deslizamentos de terra (Marth et al., 2016). As declividades acentuadas da Serra Gaúcha e do Planalto Catarinense, associadas a solos de estrutura sedimentar facilmente erodidos pela ação climática e antropogênica, criam cenários de alta instabilidade geotécnica (Barbosa, 2015). As planícies de inundaçāo dos rios Taquari-Antas, Uruguai e Iguaçu, caracterizadas por baixas declividades e solos aluviais, são naturalmente sujeitas a inundações periódicas. Entretanto, a amplitude do relevo à jusante, a declividade das planícies e as intervenções antropogênicas diretas e indiretas tornaram-se fatores determinantes para a intensificação da suscetibilidade aos desastres, particularmente quando submetidos aos eventos intensos de chuvas que rapidamente promovem elevado escoamento superficial.

O processo de urbanização na Região Sul tem sido caracterizado pela ocupação sistemática de áreas consideradas inadequadas, incluindo vertentes de altas declividades, fundos de vales e planícies de inundaçāo (Beltramin & Morais, 2024). A ausência de planejamento territorial adequado tem resultado na concentração de população em áreas de alta fragilidade ambiental e sujeitas à impactos de origem geo-hidrológica. Em Blumenau (SC), por exemplo, observa-se que populações de baixa renda são sistematicamente direcionadas para áreas de maior risco, incluindo margens de rios, encostas instáveis e áreas sujeitas a alagamentos, situação que amplifica exponencialmente suas vulnerabilidades (Souza et al., 2021).

Os ajustes fluviais decorrentes de canalizações inadequadas e gestão imprópria da drenagem urbana têm modificado significativamente os padrões de escoamento, criando novos focos de risco em áreas anteriormente estáveis (Beltramin & Morais, 2024). A retificação de cursos d'água sem consideração dos processos geomorfológicos naturais também tem resultado em erosão acelerada e instabilização de margens, o que acelera o processo de assoreamento de rios e córregos, aumento a suscetibilidade às inundações. Junto a estes fatores, a degradação ambiental tem contribuído significativamente para o aumento do risco de desastres geo-hidrometeorológicos. A remoção da cobertura vegetal nativa, especialmente em encostas e áreas de preservação permanente, tem resultado na perda de estabilidade geotécnica e no aumento da erosão superficial (Silva et al., 2022), além de também acelerar os processos erosivos mencionados anteriormente.

A conversão de áreas florestais para usos agrícola e urbano também tem alterado significativamente os padrões de infiltração e escoamento superficial, de modo que estudos em algumas bacias hidrográficas da região Sul demonstram correlação direta entre a perda de cobertura florestal e o aumento da frequência e intensidade de inundações e deslizamentos (Canil et al., 2020). Além destes fatores, as modificações antropogênicas nos sistemas hídricos regionais incluem retificação de canais, construção de diques, aterramento de várzeas e alteração de padrões de drenagem natural (Beltramin & Morais, 2024). Estas intervenções têm resultado em alterações nos regimes de vazão, modificação de padrões de sedimentação e criação de novos pontos de instabilidade geomorfológica.

Desta forma, estes fatores de vulnerabilidade e elevada exposição se demonstram como ingredientes que favorecem a ocorrências de desastres quando eventos de chuvas volumosas e intensas se concretizam. Do ponto de vista climático, a Região Sul é caracterizada por um clima subtropical justamente marcado por episódios frequentes de chuvas persistentes e volumosas, os quais contribuem para a saturação do solo e a deflagração de eventos geo-hidrológicos extremos (Oliveira et al., 2019).

Os principais sistemas meteorológicos associados a desastres geo-hidrometeorológicos são, em geral, de escala sinótica, destacando-se os sistemas frontais, ciclones extratropicais, jatos de baixos níveis, ZCAS e os anticiclones subtropicais do Atlântico Sul e do Pacífico (Pugas et al., 2024). Sistemas oceânicos também exercem influência relevante, entre eles a Corrente do Brasil e a Corrente das Malvinas (Stramma et al., 1990),

bem como variabilidades de baixa frequência, como a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação Sul associada ao fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENOS). Este último apresenta papel destacado na variabilidade climática regional, uma vez que as fases El Niño e La Niña modulam significativamente a distribuição espacial e a intensidade das precipitações, além da frequência de eventos extremos (Fernandes & Rodrigues, 2018), sendo que eventos El Niño têm forte correlação com a ocorrência de deslizamentos de terra na região (Emberson et al., 2021). Tal modulação está associada, em parte, à influência exercida sobre a circulação atmosférica regional, especialmente na variabilidade e intensidade dos jatos de baixo nível, responsáveis pelo transporte de umidade para a região. Inclusive, nos estudos conduzidos após o grande desastre de 2024, evidenciou-se que eventos de El Niño têm aumentado de 2 a 5 vezes a probabilidade e de 3% a 10% a intensidade das chuvas extremas no Sul do Brasil, enquanto as mudanças climáticas induzidas pelo homem dobraram sua frequência e elevaram a intensidade em até 9%, amplificando o risco geo-hidrológico na região. (Clark et al., 2024).

A respeito das mudanças climáticas observadas mais relevantes, dados pluviométricos de 1961 a 2020 evidenciam aumento significativo na intensidade e na frequência de eventos extremos na Região Sul do Brasil (Martini, 2022; Fernandes & Rodrigues, 2018). Em estudo mais recente, Dunn et al. (2024) evidenciaram que a Região Sul do Brasil apresenta uma tendência consistente de aumento nos extremos de precipitação desde 1950. Utilizando dados observacionais e de reanálise para o período de 1950 a 2018, os autores analisaram diversos indicadores de eventos extremos de chuvas, identificando a região como uma das áreas com maiores extensões contíguas no mundo apresentando elevação sistemática, por década, tanto na frequência quanto na magnitude desses eventos.

Projeções climáticas para as próximas décadas indicam que essa será a região mais crítica do país quanto à intensificação de extremos de precipitação, com elevada confiabilidade devido à convergência entre diferentes modelos climáticos (Pillar & Overbeck, 2024; Gomes et al., 2022; Marengo et al., 2021). A Terceira Comunicação Nacional às Mudanças Climáticas (Brasil, 2016) já havia identificado esse elevado risco climático, destacando a vulnerabilidade a desastres geo-hidrológicos e projetando agravamento nas décadas seguintes com o avanço do aquecimento global (Camarinha et al. 2016, Debortoli et al. 2016; Debortoli et al. 2017). Essas conclusões foram reiteradas pela Quarta Comunicação Nacional do

Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Brasil, 2020) e corroboradas por estudos posteriores, como de Marengo et al. (2021), que mantêm a consistência no diagnóstico e prognóstico sobre a criticidade regional. Além disso, as projeções apontam aumento da variabilidade interanual, com alternância de períodos mais severos de secas e de chuvas extremas, intensificando o risco de inundações e movimentos de massa (Gomes et al., 2022; Martini, 2022).

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Nordeste e mudanças climáticas associadas

Embora geralmente associada à seca, a Região Nordeste apresenta cenários significativos de riscos para desastres induzidos por chuvas, especialmente nas faixas litorâneas e em áreas de clima tropical úmido. Capitais, como Recife (PE), Salvador (BA), Maceió (AL) e Fortaleza (CE) e cidades vizinhas que compõem suas regiões metropolitanas enfrentam episódios recorrentes de alagamentos urbanos causados pela combinação de marés elevadas, falhas de drenagem e chuvas intensas concentradas em curtos períodos. Essas cidades também apresentam riscos de deslizamentos em áreas densamente povoadas, situadas em morros e encostas costeiras com solos altamente suscetíveis à instabilidade que são amplificados pelas alterações humanas durante sua ocupação, muitas vezes de forma irregular. A vulnerabilidade urbana, marcada por desigualdade social e infraestrutura deficiente, amplifica os efeitos desses eventos mesmo quando sua magnitude não é extrema.

Um dado de extrema importância para o entendimento dos desastres geo-hidrometeorológicos se refere à elevada exposição da população, especialmente nas regiões metropolitanas. Saito et al. (2018) identificaram que a região Nordeste concentra cerca de 15% da população brasileira residente em áreas de risco reconhecidas, totalizando mais de 2,7 milhões de pessoas, com alta concentração nas regiões metropolitanas de Salvador (BA), Recife (PE), Fortaleza (CE) e no leste alagoano, marcadas por elevada vulnerabilidade social. Em termos absolutos, a região Sudeste apresenta o maior contingente populacional exposto a riscos geo-hidrológicos; entretanto, na região Nordeste, aproximadamente 15 em cada 100 habitantes vive em áreas suscetíveis a deslizamentos ou inundações. Ademais, outras cidades nordestinas também demonstram padrões similares, onde a alta densidade populacional em ocupações ir-

regulares, desprovidas de infraestrutura adequada, intensifica a suscetibilidade a deslizamentos de terra, conforme observado por Almeida et al. (2014) no município de São Luís (MA).

Dentre os principais condicionantes naturais dos desastres mais relevantes na Região Nordeste, destaca-se a Formação Barreiras, uma formação geológica amplamente distribuída no litoral do Nordeste brasileiro, caracterizada por depósitos sedimentares arenosos e argilosos pouco consolidados (Arai, 2006). Sua baixa coesão e alta permeabilidade, aliadas à presença de declividades acentuadas e à atuação de regimes pluviométricos intensos em algumas épocas do ano, refletem em uma elevada suscetibilidade à instabilidade de taludes que recorrentemente causam deslizamentos de terra. Esse quadro é agravado pela ocupação urbana desordenada e pela ausência de sistemas adequados de drenagem superficial, fatores que favorecem a infiltração e a elevação da pressão neutra nos solos. Municípios como Salvador e Lauro de Freitas (BA), Recife e Jaboatão dos Guararapes (PE) e Natal (RN) apresentam histórico recorrente de eventos desse tipo, com registros de desastres significativos relacionados a períodos de chuvas intensas, relacionados, de um modo geral, à ocupação antrópica desordenada associada à Formação Barreiras (Coutinho & Silva, 2005).

Do ponto de vista climático, o Nordeste brasileiro está sujeito a um complexo sistema de fatores climáticos e meteorológicos que potencializam a ocorrência de desastres geo-hidrometeorológicos. As Ondas de Leste constituem o principal mecanismo atmosférico, sendo responsáveis por 50% dos episódios de chuva intensa e 60% do volume de precipitação no leste da região (Seigerman et al., 2024). Esses sistemas costumam ter duração de 3-8 dias, interagem com Sistemas Convectivos de Mesoescala que se propagam sobre o Atlântico Sul-equatorial, intensificando a atividade convectiva próxima ao litoral brasileiro (Seigerman et al., 2024), atingindo principalmente os municípios costeiros da faixa leste do Nordeste, justamente onde se concentra a maior parte da população.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também exerce influência determinante na precipitação interanual e interdecadal, especialmente nas regiões do Agreste, Sertão e Meio-Norte (dos Santos et al., 2023), porém menos relevante para explicar os principais desastres históricos. As condições oceânicas, particularmente as anomalias positivas de temperatura da superfície do mar sobre o Atlântico Sul-equatorial e a intensificação dos ventos alísios, favorecem o transporte excessivo de umidade

da África Ocidental para a América do Sul, contribuindo para eventos extremos (Seigerman et al., 2024).

Estudos recentes com modelos de projeção climática indicam que as mudanças climáticas no Nordeste brasileiro tendem a intensificar a variabilidade das precipitações extremas, com estimativas de aumento de até 140% no número de dias com chuvas intensas, acompanhadas de redução de até 15% nos dias secos, elevando os riscos geo-hidrológicos na região (Medeiros & Oliveira, 2023). Esse aumento é mais evidente em cenários de aquecimento global moderado e intermediário, considerados os mais prováveis nas próximas décadas. Em contrapartida, sob um cenário extremo de aquecimento de 4°C, a tendência é para um clima mais seco, com diminuição na frequência de eventos de chuvas intensas. No entanto, em relação à magnitude dos eventos extremos de precipitação, observa-se um aumento mais expressivo conforme a intensidade do aquecimento global cresce (Marengo et al, 2021; dos Santos et al., 2020), especialmente na faixa litorânea do extremo leste do Nordeste, entre Pernambuco e Natal, durante os meses de verão (dos Santos et al., 2020).

No entanto, diferentemente das Regiões Sul e Sudeste tratadas anteriormente, as evidências sobre as mudanças climáticas no Nordeste, tanto nas condições atuais quanto nas projeções futuras, apresentam maior grau de incertezas. No estudo de Avila-Diaz et al. (2020), por exemplo, observa-se que o sinal predominante na faixa leste da região indica redução no total anual de precipitação e nos eventos de chuvas de menor intensidade, concomitante a um aumento na frequência de dias com precipitação extrema, embora sem evidências conclusivas quanto à intensificação ou atenuação da magnitude destes eventos.

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Norte e mudanças climáticas associadas

Na Região Norte, os desastres geo-hidrometeorológicos são dominados por inundações sazonais prolongadas associadas ao pulso de cheia dos grandes rios Amazônicos (ex.: Amazonas, Solimões, Madeira, Acre), cujo padrão hidrológico é governado por variações pluviométricas em bacias de larga escala e pela propagação da onda de cheia ao longo do canal principal. Essas cheias de longa duração causam inundação de várzeas e paleovárzeas, inundam áreas de produção e assentamentos ribeirinhos, e perturbam infraestruturas de transportes e serviços urbanos.

nos por semanas a meses, ampliando riscos sanitários, logísticos e socioeconômicos nas cidades de Manaus, Porto Velho, Rio Branco e Santarém (Pinel et al., 2019). Estudos observacionais e de reanálise recentes mostram que os episódios extremos de inundação na bacia amazônica aumentaram em frequência e duração nas últimas décadas, em parte decorrentes de mudanças na circulação atmosférica tropical e de alterações no balanço entre precipitação e escoamento, o que tem elevado a exposição das populações ribeirinhas e urbanas (Barichivich et al., 2018; Pinel et al., 2019).

Além das inundações de planície, processos erosivos e deslizamentos de terra localizados em áreas de margens de rios são processos relevantes e muitas vezes vinculados à dinâmica fluvial. A erosão de margem pode levar ao solapamento das margens, e a migração de meandros promovem perda abrupta de resistência do solo, gerando o fenômeno conhecido localmente como “terrás caídas”, especialmente quando a coesão do solo é reduzida por saturação prolongada ou por alívio de tensões durante períodos de estiagens.

Nas áreas urbanas amazônicas, como Manaus, o risco associado aos deslizamentos de terra é amplificado por fatores antrópicos, mesmo em regiões com moderada suscetibilidade natural. Cortes irregulares de taludes, aterros mal executados, perda de cobertura vegetal e deficiência nos sistemas de drenagem alteram as condições geomorfológicas e hidrológicas locais favorecendo a ocorrência de escorregamentos mesmo em eventos pluviométricos de intensidade moderada (Ramos et al., 2019).

Quanto às mudanças climáticas e sua relação com os desastres geo-hidrometeorológicos mais relevantes na região, tem-se evidências de que o aquecimento substancial do Atlântico tropical, desde a década de 1990, tem sido um fator central na intensificação do ciclo hidrológico na Amazônia. Esse aquecimento aumenta o vapor de água atmosférico, que é transportado pelos ventos alísios para a bacia do norte da Amazônia, elevando a precipitação e a vazão, especialmente durante a estação chuvosa (Gloor et al. 2013; Barichivich et al. 2018; Wang et al. 2018). Marengo et al. (2024) evidenciam que estas alterações se refletiram em um aumento de cinco vezes nos eventos de inundações severas na Amazônia central nas últimas décadas (período entre 2001 e 2021), com a duração total em Manaus sendo 20% maior do que aquela durante o século XX inteiro. As tendências de precipitação variam entre o norte e o sul da Amazônia, com

o norte experimentando aumento da atividade convectiva e da chuva, em contraste com a diminuição na porção sul.

Um estudo conduzido por Pinho et al. (2024) destaca muito bem o impacto socioeconômico associado a estas mudanças climáticas, ainda que parcialmente. Entre 2006 e 2010, foi registrada uma média anual de aproximadamente 540 mil pessoas afetadas por eventos hidrológicos na região. No período mais recente, de 2018 a 2022, o número saltou para cerca de 1,78 milhão de pessoas por ano, representando um aumento de 229%. No mesmo intervalo, as perdas econômicas também se intensificaram de forma significativa, passando de uma média anual de US\$ 132,8 milhões (2006–2010) para US\$ 634,2 milhões (2018–2022) — um incremento de 377%.

Estudos que analisaram projeções climáticas para a Região Norte do Brasil indicam a persistência e, em alguns cenários, a intensificação das tendências observadas de aumento na ocorrência de eventos extremos, embora com níveis de incerteza mais elevados em comparação às regiões Sul e Sudeste (Debortoli et al., 2016; Marengo et al., 2021). De forma geral, os modelos climáticos apontam para uma redução no total anual de precipitação, concomitante a um aumento na frequência e na magnitude de eventos de chuvas intensas. A intensidade dessas alterações varia de fraca a moderada, dependendo do cenário de aquecimento global considerado, sendo mais pronunciadas sob maiores níveis de aquecimento (Avila-Díaz et al., 2020; Debortoli et al., 2016; Marengo et al., 2021). Esses resultados reforçam a importância de incorporar projeções climáticas derivadas de múltiplos modelos e cenários na formulação de estratégias de adaptação, considerando tanto a sensibilidade da região a variações hidrológicas quanto sua elevada vulnerabilidade socioambiental. Paralelamente, destaca-se a necessidade de ampliar e aprofundar os estudos observacionais, de modo a reduzir as incertezas associadas às projeções e aprimorar a base científica para a tomada de decisão.

Panorama geral dos desastres geo-hidrometeorológicos na Região Centro-Oeste e mudanças climáticas associadas

A região Centro-Oeste é a que apresenta a menor quantidade de registros históricos de desastres geo-hidrometeorológicos, muito em decorrência de suas características topográficas, onde predominam relevos suaves; de sua baixa densidade demográfica e do clima ser me-

nos propício a episódios de chuvas muito intensas e comparação com as demais regiões.

Ainda assim, o Centro-Oeste brasileiro tem apresentado aumento na ocorrência de enxurradas e inundações urbanas em suas áreas metropolitanas, fenômeno explicado por uma combinação de mudança no padrão de ocupação territorial, marcado pela expansão periurbana acelerada e impermeabilização do solo, e por variações recentes na intensidade de eventos de chuva de curta duração. Em cidades como Goiânia, Cuiabá e Campo Grande, a conversão rápida de superfícies permeáveis em áreas pavimentadas e edificadas, acompanhada de insuficiente atualização e manutenção dos sistemas de drenagem, reduz a capacidade de armazenamento e infiltração local e eleva o escoamento superficial, propiciando eventos de enxurradas de alta energia e curta duração que provocam danos pontuais e consideráveis (Souza et al., 2021). Estudos de suscetibilidade urbana e índices de inundação aplicados a bacias urbanas do Centro-Oeste mostram que unidades hidrogeomorfológicas locais e micro-declividades controlam onde o escoamento da água se concentra, de modo que mesmo chuvas de intensidades moderadas podem gerar alagamentos severos e inundações em setores com drenagem subdimensionada e ocupação de fundos de vale (Mattos et al., 2021; Moraes & Gonçalves, 2024).

Adicionalmente, análises de séries pluviométricas regionais e estudos de tendência indicam sinais heterogêneos no Centro-Oeste. Enquanto a precipitação anual total não apresenta aumento consistente em todas as sub-regiões, há evidências de crescimento na frequência e intensidade de eventos extremos de curta duração (análises pautadas pelos indicadores RX1day, R95p, etc.) especialmente em Goiás e Distrito Federal (Debortoli et al., 2016), o que, em conjunto com fatores de ocupação descritos anteriormente, amplifica os riscos urbanos contemporâneo (Valverde & Marengo, 2014; Battisti et al., 2025).

Os resultados de estudos que incorporaram projeções do clima futuro são inconclusivos sobre os padrões de aumento de eventos extremos de precipitação para o futuro próximo, embora a tendência geral seja de aumento discreto tanto em frequência quanto magnitude (Debortoli et al., 2016; Marengo et al. 2021; Avila-Diaz et al., 2020). No entanto, para a segunda metade do século XXI e/ou em cenários que o aquecimento global supere 2°C, os resultados são mais consistentes ao indicar um aumento

significativo dos eventos extremos de precipitação (Debortoli et al., 2016; Marengo et al. 2021; Avila-Diaz et al., 2020).

De certa forma, esses padrões e incertezas supracitados também já foram identificados em análises baseadas em dados observacionais, como no estudo de dos Santos et al. (2021). Utilizando séries históricas de precipitação entre 1979 e 2019, o estudo avaliou índices extremos padronizados e verificou que o número de dias com precipitação muito intensa (R20mm) não apresentou mudanças estatisticamente significativas na maior parte das estações analisadas. Entretanto, observou-se tendência positiva em aproximadamente 25% dos locais para a ocorrência de dias com precipitação superior a 50 mm. Além disso, tanto a precipitação máxima em um único dia (Rx1day) quanto a precipitação máxima em cinco dias consecutivos (Rx5day) exibiram, predominantemente, tendências de aumento. Em contrapartida, a precipitação anual total apresentou tendências negativas em grande parte da porção leste da região Centro-Oeste, indicando possível redistribuição intra-anual das chuvas, com eventos mais concentrados e intensos, que propiciam a ocorrência de eventos hidrológicos.

Por fim, modelagens integradas que combinam mudanças de uso do solo e cenários de precipitação mais intensos mostram que o efeito conjunto das alterações do escoamento pela elevada impermeabilização de áreas urbanas e aumento da intensidade de chuva deve multiplicar a profundidade e o tempo de retorno das inundações e alagamentos urbanos, elevando a probabilidade de falhas em sistemas de drenagem projetados para climas históricos e amplificando o risco de desastres de origem hidrológica (Mattos et al., 2021).

SECAS NOS BIOMAS BRASILEIROS

A seca é um extremo climático relacionado à baixa disponibilidade hídrica causada pelo déficit de precipitação em comparação às condições normais e frequentemente agravada pelo aumento da demanda atmosférica por água após altas temperaturas ou ventos intensos (GAR, 2020). É importante ressaltar que os efeitos da seca se acumulam lentamente ao longo do tempo e podem perdurar por meses ou anos após o retorno das chuvas aos seus valores médios.

Eventos de seca podem resultar em desastres quando a demanda por água deixa de ser suprida, causando desequilíbrio hídrico para diferentes atividades humanas (Wilhite e Glantz, 1987, GAR 2020). Assim, a seca se configura como um risco quando há diminuição da capacidade dos diferentes sistemas de lidar com o déficit hídrico (Cunha et al. 2018, 2019). Esse risco pode resultar em impactos nos meios de subsistência das pessoas, nos setores produtivos, na saúde dos ecossistemas e até mesmo na vida de humanos e animais (Cunha et al., 2019; Marengo et al., 2021; Cuartas et al., 2022).

Em países menos desenvolvidos, os impactos nos meios de subsistência humanos estão frequentemente associados ao nível de pobreza, intensificando ainda mais as vulnerabilidades existentes. Além disso, secas mais recorrentes e intensas também podem acelerar os processos de degradação da terra, resultando na perda de serviços ecossistêmicos a longo prazo quando os pontos de inflexão são excedidos (Vogt et al., 2011; Spinoni et al., 2015).

O Brasil tem enfrentado eventos de seca de grande magnitude desde o início do século XXI, que causaram impactos significativos em diversos biomas, incluindo a Amazônia, o Pantanal, o Cerrado e a Caatinga. Esses eventos extremos não afetam apenas a biodiversidade desses ecossistemas, mas também comprometem as condições de vida das populações humanas (Cunha et al., 2019; Cuartas et al., 2022).

A série temporal do índice de seca, denominado SPEI (Índice Padrонizado de Precipitação e Evapotranspiração) (Vicente-Serrano et al., 2010), mostra que, a partir da década de 90, as secas no Brasil se tornaram mais frequentes e intensas (valores de SPEI mais negativos e consecutivos, Figura 3a). O SPEI é um índice que considera tanto a precipitação quanto a evapotranspiração potencial (estimada com base na temperatura do ar), fornecendo uma medida integrada da disponibilidade hídrica e das condições climáticas de uma região, sendo uma maneira simples de contabilizar desvios do balanço hídrico de uma determinada região.

Segundo dados do SPEI (Figura 3a), o país enfrentou três grandes secas (picos negativos e consecutivos do SPEI, abaixo de -1,0): a primeira entre 1997 e 1998, a segunda entre 2015 e 2016 e a última em 2023 e 2024. Vale ressaltar que a seca de 2015-2016 superou a de 1997-1998, mas a última de 2023-2024 apresentou valores mais negativos do SPEI, indicando ser a mais intensa da série histórica. Esse cenário se deveu não apenas ao déficit de chuvas, mas também à ocorrência simultânea de eventos de

seca e extremos de calor, especialmente entre os anos de 2023 e 2024. Em diferentes partes do globo, a ocorrência simultânea de múltiplos riscos climáticos, como seca e calor (composto seca-calor), também aumentou e projeta-se que aumente ainda mais neste século (Zscheischler et al. 2018, 2020; Vogel et al. 2020; IPCC 2021).

Em comparação com as décadas anteriores, nos últimos dez anos (2014 a 2024), as secas têm sido mais recorrentes e intensas nos biomas Cerrado, Amazônia e Pantanal (valores de SPEI persistentemente mais negativos, Figuras 3b, c, d e g), portanto, biomas fora do limite do semiárido brasileiro, região onde as secas costumavam ser mais recorrentes do que no restante do país.

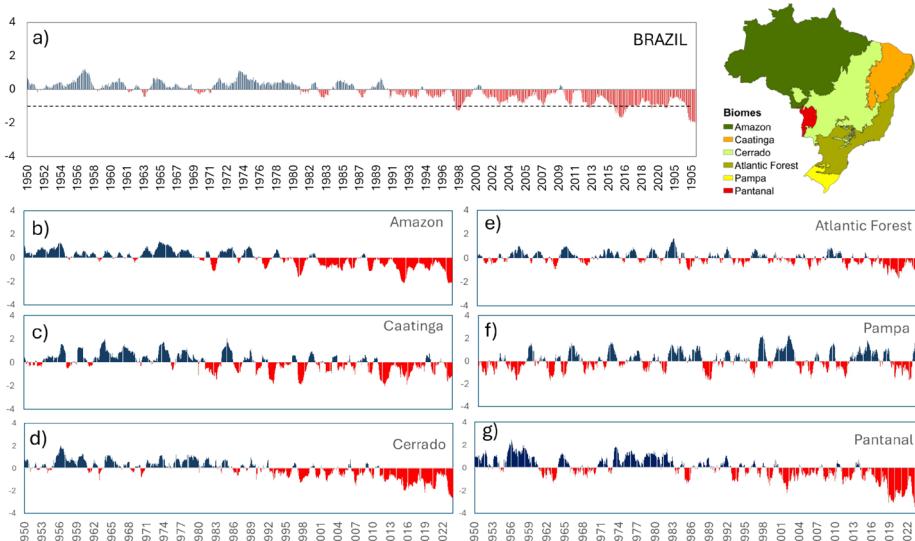


Figura 3: Evolução temporal das secas no Brasil considerando o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) de 1951 a 2024. As barras azuis indicam anos em que a precipitação foi maior que a evapotranspiração (balanço hídrico positivo), indicando períodos mais chuvosos, com maior disponibilidade hídrica, enquanto as barras vermelhas indicam anos em que a evapotranspiração foi maior que a precipitação (balanço hídrico negativo), resultando em condições mais secas, com menor disponibilidade hídrica. (Fonte dos dados do SPEI: Vicente-Serrano et al., 2010; pós-processamento e análise: CEMADEN/MCTI).

De acordo com dados do Índice Integrado de Secas - IDI (Cunha et al., 2019, Zeri et al., 2024), um índice operacional para monitoramento

de secas fornecido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN/MCTI, em termos de extensão, a seca de 2023-2024 lidera, abrangendo cerca de 5 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 59% do território brasileiro. Em segundo lugar, a seca de 2015-2016 afetou cerca de 4,6 milhões de km² (aproximadamente 54% do país). A seca de 1997-1998 atingiu cerca de 3,6 milhões de km², o equivalente a 42% do território nacional.

Dados do CEMADEN (Monitoramento de Seca para o Brasil — Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI) mostram que, em 2024, mais da metade do Brasil sofreu os impactos diretos da crise climática, na qual os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal enfrentaram a pior seca dos últimos 70 anos. Até setembro de 2024, aproximadamente 1.200 municípios no Brasil enfrentavam condições de seca severa. Em situação de seca extrema, havia 263 municípios brasileiros. O déficit pluviométrico observado desde a primavera de 2023 em uma área tão extensa do Brasil (abrangendo as regiões Norte a Sudeste do país), e a ocorrência de altas temperaturas, ondas de calor e baixa umidade relativa do ar, atingindo valores próximos a 7% em parte da região Centro-Oeste, impulsionaram a propagação de incêndios.

Embora historicamente as secas sejam mais recorrentes no semiárido, nos últimos anos, as secas têm sido bastante severas, causando impactos em diferentes regiões do Brasil.

No Bioma Amazônia, destacam-se as secas ocorridas em 1982-83, 1997-98, 2005, 2010, 2015-16 e, mais recentemente, em 2023-24 (Marengo, 2013; Jiménez-Muñoz et al., 2016; CEMADEN, 2023; Espinoza et al., 2023, Anderson et al., XX). Cada evento de seca apresenta um padrão diferente em termos de causas físicas e distribuição geográfica do déficit hídrico (Cunha et al., 2023). As secas de 1982-83, 1997-98, 2010 e 2015-16 foram associadas ao El Niño, enquanto a seca de 2005 foi associada ao Atlântico Tropical Norte (NTA) mais quente (Marengo, 2013; Aragão et al., 2018). Durante a seca de 2005, grande parte do sudoeste da Amazônia sofreu deficiência de chuvas; em 2010, as áreas que sofreram seca foram as partes central e oriental da Amazônia, e em 1983 e 1998, quase toda a Amazônia setentrional, central e oriental sofreu deficiência de chuvas (Alves et al., 2013). Por sua vez, a seca de 2015-16 ocorreu devido a um dos eventos El Niño mais fortes já registrados associados ao aquecimento da NTA, excedendo a extensão espacial dos impactos ocorridos em 2005 e 2010, particularmente nas partes oriental e meridional da Amazônia (Er-

fanian et al., 2017; Jiménez-Muñoz et al., 2016; Jiménez et al., 2018; Anderson et al., 2018).

Recentemente, em 2023-24, a Amazônia enfrentou outro evento histórico de seca, somado aos eventos extremos de calor (Figura 4). Segundo dados do IDI, a seca de 2023-2024, além de ser a maior em extensão territorial, também foi caracterizada pela mais longa seca já ocorrida fora do Semiárido. Parte do bioma registrou déficit hídrico por 18 a 20 meses consecutivos.

Os efeitos da seca foram visíveis na maioria dos principais rios da Amazônia, incluindo o Negro, o Solimões, o Purus, o Juruá e o Madeira, impactando severamente o transporte aquaviário, comprometendo o transporte de água e alimentos e isolando comunidades indígenas. Em outubro de 2023, o nível da água no porto de Manaus atingiu 12,70 m, o menor nível registrado desde 1902 (Espinoza et al., 2023).

A região Sul do país, que abrange majoritariamente os biomas Mata Atlântica e Pampa, também registrou eventos recorrentes de seca, especialmente nos anos de 2004-05, 2012-13 e 2019-22 (Berlato, 2005; Braz Pinto, 2017; Cardoso et al., 2020). Segundo Fernandes et al. (2021), este último evento pode estar associado à fase negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e às condições de neutralidade no Pacífico Equatorial.

Como consequência da seca de 2012, a maior parte da região Sul sofreu um esgotamento substancial das águas superficiais e subterrâneas, afetando o abastecimento de água em propriedades rurais e a produção agrícola e pecuária. No evento de seca de 2019 a 2020, o primeiro trimestre de 2020 foi o mais crítico em termos de intensidade e extensão, visto que 100% dos municípios de toda a região foram classificados como tendo condição de seca severa a excepcional (Fernandes et al., 2021 e CEMADEN-MCTI, 2024). O impacto dessa seca também pôde ser observado pela queda da vazão do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

É importante destacar que, até pouco antes da enchente histórica ocorrida no Rio Grande do Sul, em maio de 2024, estado que possui cerca de 68,8% de seu território coberto pelo bioma Pampa, a região enfrentava uma seca severa e prolongada. Os governos ainda realizavam ações de resposta à seca quando foram surpreendidos pela grande enchente, o que impôs um desafio adicional à gestão dos riscos de desastres relacionados a eventos extremos. Em um curto espaço de tempo, foi necessário passar da resposta a uma crise hídrica para o enfrentamento dos impactos causados por um evento hidrológico de grandes proporções.

Na região Sudeste, composta majoritariamente pelos biomas Mata Atlântica (cerca de 60% do território) e Cerrado (aproximadamente 30%), durante os verões de 2013-14 e 2014-15, a região enfrentou condições de seca e uma crise hídrica crítica com impactos em diversos setores da sociedade, incluindo abastecimento humano, agricultura e geração de energia hidrelétrica (Coelho et al., 2015; Nobre et al., 2016). A principal causa dessa condição atmosférica deveu-se à presença de um sistema de alta pressão conhecido como “bloqueios”, anormalmente intenso e persistente, impedindo a passagem de sistemas frontais (Marengo et al., 2015; Coelho et al., 2015). As bacias hidrográficas da região Sudeste, tanto para geração quanto para abastecimento de energia hidrelétrica, voltaram a apresentar condições críticas entre os anos de 2022 e 2024 (Cuartas et al., 2022; 2024; OMM, 2022).

O volume dos reservatórios de água atingiu seus níveis mais críticos. Em particular, o Sistema Cantareira de Abastecimento de Água, localizado na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais, enfrentou seu pior período de escassez hídrica, tendo que utilizar o volume morto entre 12 de julho de 2014 e 30 de dezembro de 2015 (537 dias). Na época, a escassez hídrica afetou mais de 8,8 milhões de pessoas (Deusdá et al., 2020; Cunha et al., 2019).

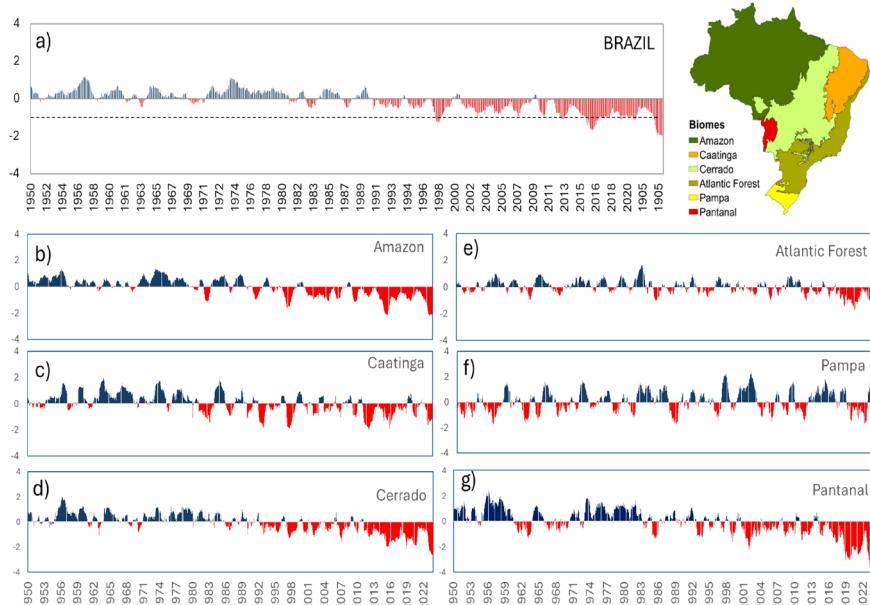


Figura 4: Mapas anuais do Índice Integrado de Secas (IIS, Fonte: CEMADEN/MCTI).

No que se refere ao bioma Caatinga, predominante no semiárido brasileiro, trata-se de uma área reconhecidamente vulnerável a fatores climáticos, especialmente devido à baixa disponibilidade hídrica e à alta vulnerabilidade socioeconômica (Marengo et al., 2018; Gomes e Wille-gaignon, 2021). Os principais eventos de seca na região foram 1982-1983, 1986-87, 1992-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005, 2010 e 2012-2017 (Magalhães et al. 1988, Gutierrez et al. 2014, Wilhite et al. 2014, Marengo et al. 2016). Durante os anos de seca extrema de 1982-83 e 1997-98, tanto o fenômeno El Niño quanto a influência de águas mais quentes no Atlântico Tropical Norte (NTA) foram responsáveis por mudanças na circulação que reduziram a precipitação na região (Nobre et al., 2016; Marengo et al., 2013). Por outro lado, o início da seca de 2012 foi devido a um evento La Niña, no qual o resfriamento das águas do Pacífico central, juntamente com o aquecimento do NTA, favoreceu a posição da ZCIT mais ao norte de sua posição climatológica (Rodrigues e McPhaden, 2014). Em 2015, com a caracterização do El Niño, as condições de seca que ocorriam desde 2012 acabaram se intensificando e a seca entre 2012 e 2017 na região semiárida foi definida como o “evento” mais intenso dos últimos 30 anos (Brito et al., 2017; Cunha et al., 2018). Considerando os impactos acumulados entre 2012 e 2017, cerca de 1.100 municípios foram afetados (33,4 milhões de pessoas afetadas por ano), especialmente em relação ao abastecimento de água e perdas em sistemas agroprodutivos, com impactos estimados em aproximadamente R\$ 104 bilhões (Marengo et al., 2017). Em 2023, grande parte da Caatinga foi novamente afetada por outro evento de seca, menos intenso em termos de impactos, mas causando condições severas de seca em alguns municípios do oeste da Bahia, afetando áreas agrícolas e pastagens (CEMADEN, 2023, Boletim de Outubro). Os fatores climáticos atribuídos a este evento foram, novamente, devido à ação do El Niño e ao aquecimento da NTA (CEMADEN, 2023).

Embora as secas sejam cada vez mais recorrentes em todo o país, o semiárido nordestino ainda concentra os eventos mais intensos (excepcionais) da história recente do Brasil.

Conforme indicado pelas Figuras 3 e 4, nos últimos anos, entre todos os biomas brasileiros, a seca tem sido mais intensa, especialmente nos biomas Pantanal e Cerrado, que compõem a região central do país. Os biomas Pantanal enfrentaram uma seca severa entre 2019 e 2024, contribuindo para a propagação de incêndios e afetando a biodiversidade

natural e os setores do agronegócio e da pecuária. Essa seca prolongada impactou severamente os recursos hídricos no Pantanal. Em 2020, o nível do rio atingiu valores extremamente baixos e, em alguns trechos, o transporte teve que ser restringido. Níveis muito baixos dos rios afetaram a mobilidade de pessoas e o transporte de soja e minerais para o Oceano Atlântico através da Hidrovia Paraná-Paraguai (Marengo et al., 2021). No período chuvoso de 2023-24, a Bacia do Paraguai (bacia do bioma Pantanal) registrou déficits de precipitação em torno de 300 mm, o que indica que apenas 60% da precipitação esperada para o período chuvoso, iniciado em outubro de 2023, foi observada, prolongando assim os impactos das secas.

O Pantanal tem atraído atenção especial por ser um dos ecossistemas brasileiros mais ameaçados por pressões antrópicas diretas e mudanças climáticas. Cunha et al., 2023, mostraram que eventos compostos de seca e calor têm sido mais recorrentes e generalizados desde 2000 no Pantanal. Além disso, houve um padrão de mudança para condições mais quentes e secas nos últimos 40 anos, contribuindo também para a redução da disponibilidade hídrica e para a disseminação de incêndios no Pantanal. Tomasella et al. (2022), utilizando índices de seca (SPI e SPEI) derivados de dados de estações meteorológicas, mostraram uma tendência significativa para condições mais secas e quentes no Brasil Central (incluindo o Pantanal) em diferentes escalas de tempo, especialmente para escalas de tempo de 12 meses ou mais.

De acordo com dados da Produção Agrícola Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>), a produtividade do milho foi 50% menor na safra de 2020 em comparação com o ano anterior. Além disso, a severa seca de 2020 causou perdas de pelo menos 1 milhão de toneladas de grãos na colheita de soja. Diante dessa situação, o governo declarou estado de emergência para facilitar o acesso ao seguro agrícola (Cunha et al., 2023).

Além dos impactos na produtividade agrícola, as secas associadas a extremos de calor também estão relacionadas ao aumento do risco de incêndios, especialmente em regiões tropicais. Prevê-se que o Pantanal se torne mais inflamável em um futuro clima mais seco e quente, em combinação com paisagens modificadas pelo homem, e, portanto, particularmente vulnerável ao aumento do risco de incêndios (Ribeiro et al., 2022; Afroz et al., 2023). Embora pequenas queimadas sejam historicamente utilizadas para limpeza de terras para subsistência (atividades

agrícolas), a seca excepcionalmente longa de 2019 e 2020 encorajou muitas pessoas a atearem fogo criminoso para expansão de área e terras (Libonati et al. 2020, 2022; Ribeiro et al. 2022). Essa situação culminou na queima de quase 30% do Bioma, matando 17 milhões de vertebrados (Ribeiro et al. 2022).

A maioria dos últimos grandes eventos de seca na região Central do país foi causada principalmente pela ocorrência de bloqueios atmosféricos que impediram a passagem de sistemas meteorológicos causadores de chuvas (Marengo et al., 2021). Alguns estudos indicam que os bloqueios atmosféricos estão ocorrendo com mais frequência globalmente desde o início do século (Lupo et al., 2021).

A frequência crescente de eventos extremos, como ondas de calor e secas prolongadas, tem contribuído significativamente para mudanças nos padrões climáticos ao longo do tempo, intensificando o fenômeno da aridez. Esta, por sua vez, é caracterizada como uma condição climática de longa duração, resultante de um déficit hídrico. Esse déficit se deve à precipitação média insuficiente combinada a uma alta taxa de evapotranspiração, que consiste na perda de água para a atmosfera devido ao calor.

Tomasella et al. (2025), analisando uma série temporal do Índice de Aridez de 1961 a 2020, indicou uma tendência para condições mais secas no centro e nordeste do país, enquanto a região Sul apresentou mudanças para condições mais úmidas. Observou-se também a expansão de áreas semiáridas em detrimento de regiões secas, subúmidas e úmidas no Bioma Caatinga. Os autores também mostraram que essas tendências se aceleraram no período de 1991 a 2020, indicando intensificação. Durante esse período, foi observada pela primeira vez uma área de $> 4.200 \text{ km}^2$ dentro da categoria árida, de acordo com a classificação convencional (Figura 3). Além disso, novas áreas, com tamanhos variando de 1.200 a 11.500 km^2 , incluídas na categoria subúmida seca, foram detectadas no Brasil Central (parte do Cerrado e Pantanal). Além do Índice de Aridez, os autores também analisaram uma série temporal do Índice de Saúde da Vegetação (VHI, Kogan et al., XX), que também indicou tendências negativas em todos os biomas brasileiros, sugerindo um aumento do estresse da vegetação ao longo dos anos.

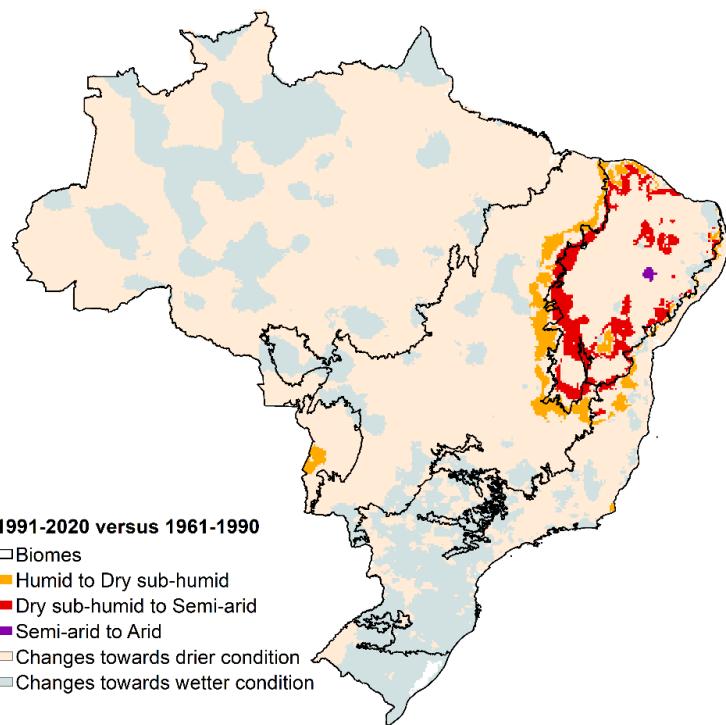


Figura 3: Mudanças nas classes de IA entre os períodos 1991-2020 e 1961-1990 (Fonte: Tomasella et al., 2025).

Diversos estudos já indicam que há fortes evidências de que as mudanças climáticas aumentarão o risco e a intensidade das secas em todo o mundo (IPCC, 2021, Cook et al., 2020, Marengo et al., 2021). No Brasil, estudos mostram que tais mudanças podem causar impactos significativos na produção agrícola por meio do aumento da frequência de secas no país (Assad et al., 2013; Marengo et al., 2017, 2020, 2021). Segundo Marengo et al. (2021), especialmente na região semiárida do Brasil, onde predomina a agricultura familiar de sequeiro e alta vulnerabilidade socioeconômica (Figura 3), as perdas de produtividade podem levar ao aumento da pobreza, aos conflitos por terra e à migração em massa para centros urbanos superpovoados.

De modo geral, todos os municípios com maior vulnerabilidade socioeconômica podem ser mais afetados quando ocorre um cenário de maior frequência, intensidade e duração de seca. Além dos municípios localizados na Caatinga, municípios localizados na porção Noroeste da

Amazônia (Figura 4) também podem ser mais impactados, pois são municípios caracterizados por menores índices de desenvolvimento, pobreza, menor assistência técnica e, em suma, menor capacidade de resposta.

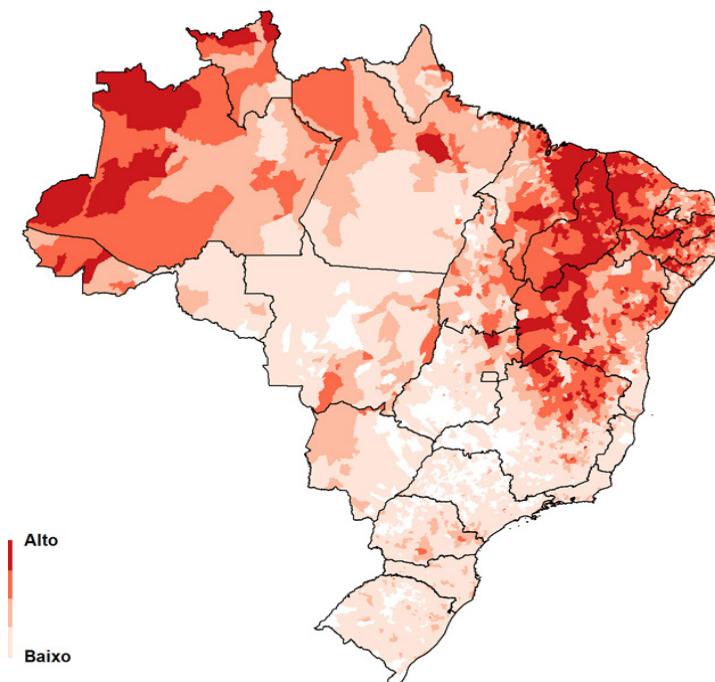


Figura 4: Vulnerabilidade socioeconômica à seca no Brasil. Tons mais escuros de vermelho indicam maior vulnerabilidade; tons mais claros indicam menor vulnerabilidade. (Fonte: CEMADEN/MCTI).

Além disso, cabe destacar que a matriz energética brasileira, embora considerada limpa e diversificada, ainda apresenta elevada dependência de energia hidrelétrica, que representa grande parcela da matriz, porém, expõe o país a crises hídricas causadas por secas intensas e prolongadas, que reduzem a geração de energia e podem levar ao acionamento de termelétricas, mais caras e poluentes.

A projeção de intensificação de secas e extremos de calor no Brasil acentua a pressão sobre a segurança alimentar, hídrica e energética do país, tornando ainda mais urgente a implementação de políticas públicas voltadas à redução das vulnerabilidades socioeconômicas e ao fortalecimento da resiliência dos sistemas produtivos do país.

AVANÇOS E DESAFIOS PARA A REDUÇÃO DE VULNERABILIDADES A DESASTRES NO BRASIL

A vulnerabilidade tem sido explorada por distintos referenciais conceituais, desde aqueles que associam diretamente aos danos diretos de desastres, até aqueles que entendem como resultado de fatores indiretos tais como níveis de exposição, graus de suscetibilidade e capacidades adaptativas das populações afetadas (Kim et al, 2021). Importante também destacar abordagens conceituais de vulnerabilidade que contemplam a sua composição multidimensional (Birkmann e Wisner, 2006) e global, composta de diferentes tipos de vulnerabilidades interconectadas, como social, econômica, física, institucional, ideológica, dentre outras (Wilchex-Chaux, 1993). Independentemente da abordagem adotada, é consenso de que altos níveis de vulnerabilidade a desastres podem levar a danos maiores ou a um tempo de recuperação mais longo dos sistemas afetados. Portanto, a vulnerabilidade é entendida como um processo progressivo, cuja construção remete a causas profundas, pressões dinâmicas e condições inseguras (Wisner et al. 2004).

A necessidade da análise multidisciplinar sobre a ocupação humana em áreas suscetíveis às ameaças naturais tem sido destacada em estudos desde a década de 1940 (White, 1945). Diante do atual contexto de mudanças climáticas, tal demanda se faz ainda mais premente, considerando os múltiplos fatores que envolvem vulnerabilidade e adaptação. A crescente complexidade é intensificada pela inadequação de ações humanas no território, a exemplo da ocupação em encostas ou planícies de inundação desrespeitando as condições naturais. Em termos globais, a expansão de assentamentos humanos em áreas inundáveis supera aquela em zonas seguras, ou seja, cada vez mais os países estão aumentando sua exposição a eventos extremos (Rentschler et al. 2023).

A vulnerabilidade é um elemento chave para definição do nível de risco de desastres, razão pela qual esforços têm sido priorizados para o desenvolvimento de formulação de políticas de gestão de risco de desastres. Agendas globais, a exemplo do Marco de Ação de Sendai (MAS) e Agenda 2030, adotam abordagens voltadas para redução de riscos de desastres. Assim, os países signatários se comprometem a alcançar as metas propostas em tais agendas, com vistas a reduzir perdas decorrentes de desastres, com foco na vulnerabilidade das populações. Dentre as prioridades de ação do MAS, destaca-se a compreensão do risco de de-

sastres, em todas as suas dimensões: vulnerabilidade, capacidade, exposição de pessoas e ativos, características do risco e meio ambiente.

Conhecimento sobre população em áreas de risco de deslizamentos, inundações e enxurradas

Particularmente no Brasil, informações sobre as condições de vidas da população vivendo em áreas de riscos de desastres em escala nacional só foram obtidas a partir da criação de uma nova base de dados, denominada Base Territorial Estatística de Risco (BATER), cujas delimitações gráficas incorporam informações do censo populacional associadas às áreas de risco mapeadas. Tal metodologia foi inicialmente implementada para caracterização de três municípios pilotos, localizados no estado do Rio de Janeiro (Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo), e resultou de cooperação técnica entre o CEMADEN e o IBGE. No estudo, os resultados mostraram uma estimativa de aproximadamente 155.000 pessoas expostas ao risco de deslizamentos e/ou inundações em 1.357 áreas de risco (Assis Dias et al., 2018).

Cabe destacar que a associação de informações censitárias com áreas de risco não podia ser feita de forma direta e automatizada, devido às diferentes geometrias entre as áreas de risco e os setores censitários; portanto, a metodologia desenvolvida foi pioneira e representou um importante marco para o conhecimento da população exposta (Assis Dias et al., 2018). Vários estudos foram produzidos a partir de dados de BATER, proporcionando novo olhar para o tema. Alvalá et al. (2019), por exemplo, visando compreender as condições da população vivendo em áreas de riscos em escala intraurbana e a potencial aplicação de tais informações no sistema de alerta precoce brasileiro, identificaram que 825 municípios historicamente afetados por desastres no território brasileiro, contavam com população estimada de 8.266.566 pessoas vivendo em 27.660 áreas de riscos e em 2.470.506 domicílios. Esse resultado indicou que, para cada 100 habitantes, 9 viviam em áreas de risco de desastres no Brasil. Por sua vez, Saito et al (2019) revelaram que a população exposta a áreas de riscos de desastres concentra-se nas capitais e pequenas cidades do país, as quais são densamente povoadas mesmo em pequenas cidades, sugerindo que essa é uma realidade enfrentada não apenas pelas grandes cidades, assim como as áreas de risco de desastres existem mesmo dentro de municípios com alto nível de desenvolvimento humano. Os re-

sultados foram relevantes em contribuir para a compreensão da espacialização do risco de desastres no Brasil, um passo primordial para a redução de perdas humanas, revelando um problema atual enfrentado pelos municípios, independentemente da classificação de porte e do nível de desenvolvimento humano.

Indicadores, índices e cenários de vulnerabilidade

Muitos estudos têm sido conduzidos com vistas a examinar a vulnerabilidade a desastres e identificar indicadores para sua melhor compreensão. Rufat et al. (2015) analisaram os fatores de vulnerabilidade social em 67 estudos de casos de desastres associados à inundações, tendo concluído que a influência dos indicadores variou de acordo com o estágio do desastre e o cenário nacional; portanto, destacaram a necessidade de pesquisas e proveram recomendações para adaptação de indicadores contextualmente.

Os estudos sobre os efeitos da vulnerabilidade a desastres mostram que os danos diferem por elementos específicos do desenho da pesquisa dos estudos, incluindo regiões, tipos de desastres e unidade espacial de análise (Choo e Yoon, 2024). A partir dessa premissa, esses autores conduziram uma meta-análise visando analisar a conexão entre vários estudos para revelar a tendência comum da relação entre vulnerabilidade e danos causados por desastres, incluindo danos materiais e perdas humanas, examinando os efeitos comuns de fatores socioeconômicos (densidade populacional, PIB, domicílios de baixa renda e população idosa) nos danos causados por desastres a partir de 38 estudos. Neste contexto, consideraram uma análise de subgrupos para identificar a heterogeneidade dos efeitos por tipo de desastre e unidade espacial de análise dos estudos incluídos, cujos resultados mostraram que a população idosa e os domicílios de baixa renda estavam positivamente associados aos danos causados por desastres. No nível comunitário, a densidade populacional, a população idosa e os domicílios de baixa renda estavam positivamente associados aos danos causados por desastres, enquanto o PIB tendia a reduzir os danos causados por desastres em nível nacional.

No contexto brasileiro, Assis Dias et al. (2020) desenvolveram o InOV (Índice Operacional de Vulnerabilidade), com vistas a subsidiar o monitoramento e a emissão de alertas precoces para riscos de desastres no Brasil. Os dados de BATER foram cruciais para identificar áreas que

concentram grande número de populações expostas a áreas de riscos de deslizamentos. O InOV, baseado em indicadores que caracterizam as condições de exposição física dos moradores, bem como a capacidade de resposta da população para se recuperar após o desastre, foi desenvolvido para 443 municípios brasileiros, o que permitiu uma análise relacional das áreas de risco dentro de cada município. Portanto, o InOV pode subsidiar a identificação de áreas prioritárias, fornecendo informações adicionais sobre populações vulneráveis, bem como para auxiliar na identificação de áreas críticas no município que estão sob risco de desastre hidrometeorológico quando os limiares críticos de precipitação são ultrapassados.

Em termos de cenários de risco, a maioria da população urbana global vive em cidades pequenas, enquanto no Brasil, cerca de 45% reside em municípios com até 100 mil habitantes — muitos expostos a riscos como deslizamentos e inundações. O estudo conduzido por Ribeiro et al (2023) envolvendo 234 cidades das regiões Sul e Sudeste analisou a vulnerabilidade e a capacidade de enfrentamento desses municípios, divididos em duas faixas populacionais: de 20 mil a 50 mil habitantes (Classe A4) e de 50 mil a 100 mil (Classe A5). A partir de análise estatística de um conjunto de 30 indicadores quantitativos e 40 indicadores qualitativos revelou que apesar dos municípios apresentarem altos índices de desenvolvimento humano e disponibilidade de planos diretores, as vulnerabilidades estão associadas a : i) Dependência do setor agrícola ou de recursos externos; ii) Baixa escolaridade e renda (Classe A4) e Infraestrutura precária devido ao crescimento populacional acelerado (Classe A5). A análise concluiu que o porte da cidade, a estrutura econômica e as políticas públicas influenciam diretamente a vulnerabilidade. Além disso, instrumentos legais existentes são insuficientes para garantir infraestrutura adequada ou gestão eficaz de riscos em cidades pequenas.

Inclusão de vulnerabilidade em normativos

Mais recentemente, a Lei 14.750/2023 alterou a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei 12.608/2012) com intuito de “aprimorar os instrumentos de prevenção de acidentes ou desastres e de recuperação de áreas por eles atingidas, as ações de monitoramento de riscos de acidentes ou desastres e a produção de alertas antecipados”. Tal Lei incluiu diversos conceitos, dentre os quais o de vulnerabilidade como “fragili-

dade física, social, econômica ou ambiental de população ou ecossistema ante evento adverso de origem natural ou induzido pela ação humana” (Brasil, 2023).

A inclusão desse conceito na PNPDEC é um importante avanço tendo em vista que pode orientar medidas voltadas para redução de vulnerabilidades. Por outro lado, merece especial atenção o fato de associar vulnerabilidade a fragilidades, denotando forte viés socioeconômico nessa compreensão. Desastres no Brasil evidenciam que populações são duramente impactadas pelos desastres mesmo não apresentando tais fragilidades. Portanto, é fundamental a compreensão de que vulnerabilidade requer integração de múltiplos fatores, como ausência de articulação entre políticas públicas e infraestrutura urbana deficiente, que contribuem para a exposição ao risco das pessoas. Garantir a segurança das populações só será efetiva se incluida a sua totalidade, independentemente de sua condição econômica, sobretudo em contexto de convivência atual e futura com extremos.

Redução de vulnerabilidades institucionais

O Projeto Elos, conduzido pelo CEMADEN, em parceria com a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (Sedec/MDR) e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) foi uma iniciativa estratégica voltada para o fortalecimento da gestão de riscos de desastres nos municípios brasileiros. O Projeto produziu um diagnóstico das capacidades e necessidades das defesas civis municipais, considerando três eixos (estruturação, capacitação e governança), no intuito de subsidiar a implementação da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) nos municípios brasileiros.

A componente científica no projeto Elos foi fundamental para a solidez dos resultados alcançados, sobretudo na adoção dos procedimentos metodológicos adotados. Três instrumentos de pesquisa foram empregados: **i)** questionário online, por 1.993 municípios; **ii)** entrevistas em profundidade, realizadas com 31 municípios dos 26 estados brasileiros, além do Distrito Federal (DF), e, **iii)** grupos focais virtuais com 190 municípios, para promover espaços de discussão coletiva. A triangulação dos dados obtidos pela pesquisa evidenciou a fragilidade estrutural e institucional das defesas civis municipais, desde a deficiência de equipamentos básicos como computadores e viaturas, até a falta de reconhecimento profis-

sional (Brasil, 2021). Todos esses aspectos acabam por impactar diretamente nas ações de preparação, resposta e reconstrução a desastres no nível municipal.

O diagnóstico produzido constitui em subsídio fundamental para apoiar a redução de vulnerabilidades institucionais. Nesse sentido, outro resultado relevante foi a identificação dos desafios enfrentados pelas defesas civis para fortalecimento da PNPDEC como a i) demanda por profissionalização e valorização da atuação em proteção e defesa civil; ii) a escassez de recursos financeiros para implementar a PNPDEC no nível municipal; iii) ações de capacitação que considerem as especificidades das cinco regiões do país; iv) aperfeiçoamento dos processos de comunicação interna e institucional sobre riscos e desastres; e, v) fortalecimento da participação social e intersetorial (Marchezini et al, 2025).

Desafios

A produção científica brasileira vem colaborando fortemente para a consolidação de referenciais teóricos, construção de bases de dados, desenvolvimento de indicadores e métodos para avaliar as múltiplas dimensões de vulnerabilidade no país. Esses avanços contribuem para elaboração de cenários de risco de desastres mais assertivos, por exemplo, no contexto de monitoramento e alertas precoces, além de orientar ações para fortalecer as instituições e reduzir suas vulnerabilidades. Contudo, diante do crescente consenso de que as causas da vulnerabilidade são de ordem multifatorial, que interconectam entre causas profundas, condições inseguras e pressões dinâmicas (Wisner et al, 2004), trabalhar em sua redução exige invariavelmente em mudança de abordagens convencionais.

Embora esforços concretos tenham sido alcançados até o presente, trata-se de um processo progressivo e reduzir vulnerabilidades requer a articulação entre várias políticas públicas, como de meio ambiente, de urbanização, econômica, de educação, mudança climática, entre outras. Ademais, ainda é imperativo superar a concepção de que vulnerabilidade se restringe a condição de pobreza, para que as políticas alcancem todas as populações expostas às mudanças climáticas, em abordagem equitativa.

ENTRE SABERES E RESILIÊNCIA: EDUCAÇÃO E REDUÇÃO DE RISCOS DE DESASTRES COM JUSTIÇA CLIMÁTICA

Conforme ressaltado, os eventos climáticos extremos estão cada vez mais frequentes e letais, com seus efeitos impactando de forma desigual populações e ecossistemas. Inundações, secas severas, movimentos de massa, ondas de calor e incêndios florestais comprometem não apenas o ambiente, mas as sociedades. Nesse contexto de emergência climática, a Educação em Redução de Riscos de Desastres (ERRD) torna-se primordial em constituir instrumentos estratégicos para ampliar a percepção de risco, fomentar a participação cidadã e articular respostas multiescalares. Fundamentada na Educação Ambiental Climática (EAC), a EERRD promove uma leitura de mundo crítica e transformadora, ao agregar saberes científicos, tradicionais e locais na busca do fortalecimento de prevenção de riscos, capacidade adaptativa e da resiliência das comunidades no enfrentamento às mudanças do clima.

No escopo deste Capítulo, parte-se do pressuposto de que a educação deve constituir uma análise consistente do modelo que orienta as decisões globais de desenvolvimento, e exige a consideração de múltiplas dimensões – econômicas, políticas, técnicas, históricas, éticas, sociais, culturais, morais, estéticas e ambientais. Nessa perspectiva, a EAC e a EERRD assumem o papel de instigar questionamentos sobre a (IN)sustentabilidade sistêmica, valendo-se da observação, investigação, reflexão e ação junto com as pessoas e comunidades para encontrar caminhos transformadores da realidade.

Trata-se de enfrentar as causas profundas da emergência climática: o negacionismo, a falta de decisões políticas de enfrentamento, além das falsas soluções produzidas pelo capitalismo verde e pelo marketing ambiental (*greenwashing*), que visam perpetuar práticas insustentáveis efetuadas pelo modelo econômico vigente.

O desafio educacional se projeta no horizonte planetário. Atualizações do quadro das Fronteiras Planetárias⁵¹ (Rosckström et al., 2009)

51 São limites científicos planetários, definidos por um grupo de pesquisadores liderados pelo Centro de Resiliência de Estocolmo, que representam os limiares ambientais que não devem ser ultrapassados para garantir um espaço seguro de desenvolvimento humano na Terra. Os pesquisadores identificaram nove fronteiras para a zona de segurança: 1. Mudanças climáticas, 2. Integridade da biosfera, 3. Mudança de uso do solo, 4. Fluxos bioquímicos, 5. Destrução do ozônio estratosférico, 6. Uso da água doce, 7. Aci-

mostram que possivelmente seis, dos nove limites de segurança já foram ultrapassados, incluindo clima, integridade da biosfera e fluxos biogeoquímicos (Richardson et al., 2023). A superação desses limites converge com as fronteiras sociais (saúde, igualdade, paz e, com certeza, educação), pois as transgressões ambientais e as desigualdades se retroalimentam. Assim, a educação como ato político em seu sentido mais amplo é imprescindível para recuar das pressões sobre o sistema Terra e mitigar a injustiça climática. É fundamental atuar na perspectiva da mudança de paradigma baseada em conceitos e valores regenerativos, de forma coordenada, em busca de um futuro seguro e com justiça climática. Precisamos mudar o sistema, não o clima!

Embora os últimos Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2023) reconheçam a educação como um fator inversamente proporcional à vulnerabilidade social — seja por meio do empoderamento de atores locais, da aprendizagem social ou do fortalecimento de arranjos institucionais —, eles mantêm uma perspectiva funcionalista da educação, abordando-a como vetor de mitigação e adaptação. De forma semelhante, o Marco de Ação de Hyogo (2005-2015) recomendava a inclusão do “tema da RRD na educação formal e não formal, e igualmente nas atividades de capacitação” (UNISDR, 2005), mas reduzia o papel educativo à mera conscientização sobre prevenção e cultura de segurança.

O Marco de Ação de Sendai (2015-2030) avança ao reforçar a importância de diversas medidas para a gestão e o gerenciamento para redução de riscos de desastres — entre elas as educacionais, “que previnam e reduzam a exposição a perigos e a vulnerabilidade a desastres, aumentem a preparação para resposta e recuperação e, assim, fortaleçam a resiliência” (UNRRD 2015, p. 12). Assim, o Marco de Ação de Sendai avança ao destacar como prioridade a ‘compreensão do risco de desastre’, e recomenda a educação, o compartilhamento de experiências, lições aprendidas, boas práticas e formações em RRD, “incluindo o uso de mecanismos existentes de formação e aprendizagem entre pares” (UNRRD, 2015, p.15). A Agenda 2030, com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), faz “um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os

dificação do oceano, 8. Carregamento de aerossóis atmosféricos e, 9. Incorporação de novas entidades.

lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade”⁵² e traz no ODS 13.3. “melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima” (ONU, 2015, p.32).

A análise dos documentos evidencia que, apesar de bem-intencionados e impulsionarem as agendas internacionais, eles apresentam limitações no tratamento da educação. Em todos os casos, a educação é abordada de forma genérica e reducionista, como um instrumento complementar, voltado sobretudo para a conscientização, disseminação de informações ou capacitação técnica — e não como prática emancipatória e política, capaz de questionar o modelo civilizatório vigente e criar caminhos efetivamente transformadores. Essa abordagem, ainda que relevante, revela-se acrítica, não sendo capaz de enfrentar as raízes da emergência climática e socioambiental, pois não problematiza as estruturas socioeconômicas, políticas e culturais que produzem os riscos e vulnerabilidades.

No Brasil, a fragilidade da ERRD e EAC reproduz essas características nos marcos legais, mas a sociedade se manifesta. Se, por um lado, a inclusão da ERRD de modo amplo no ensino formal — anteriormente proposta pela Política Nacional da Proteção e Defesa Civil (Lei nº 12.608/2012) por meio de alteração na Lei de Diretrizes e Bases da Educação - LDB (Lei nº 9394/1996) — foi revogada (Trajber & Olivato, 2017), culminando na Base Nacional Comum Curricular (BNCC, 2018) com raras e pontuais referências aos objetivos de aprendizagem relacionados a riscos, desastres e mudanças do clima (Matsuo e Silva, 2021); por outro lado, a mobilização da sociedade civil, com apoio de órgãos governamentais, resultou na elaboração das Diretrizes de Educação Ambiental Climática (2022-2023)⁵³. Esse documento foi criado participativamente para o enfrentamento da emergência climática, e inclui 10 diretrizes que tratam da necessidade de se ter um Programa Nacional de Educação Ambiental Climática, com escala, continuidade, sinergia, acesso a recursos e qualidade a processos

52 <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

53 As Diretrizes de Educação Ambiental Climática foram capitaneadas pelo Fundo Brasileiro de Educação Ambiental (FunBEA) com a parceria do Instituto Clima e Sociedade e do Programa Cemaden Educação - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.

transformadores, e com a priorização da justiça climática com medidas fundamentadas na equidade, inclusão e bem-viver.

Recentemente, foi promulgada a Lei nº 14.926/2024, que dá atenção às mudanças do clima, à proteção da biodiversidade e aos riscos e vulnerabilidades a desastres socioambientais no âmbito da Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/ 1999), sem, contudo, oferecer o necessário aprofundamento, nem diretrizes para sua implementação na educação formal e não-formal.

A ERRD “deve cuidar sobretudo de evitar que os desastres aconteçam, apoiando a compreensão de suas causas, reduzindo as situações e populações vulneráveis, além de engajar a sociedade para trabalhar em parceria de forma preventiva. E também colaborar na preparação do exercício de autoproteção em situações de emergência que não puderam ser evitadas” (Sulaiman et al., 2021, p. 143). E a integração entre EAC e EERRD, ao mobilizar a ciência cidadã e a cogestão de riscos, converte-se, portanto, em componente crítico de qualquer estratégia nacional de adaptação (Branco et al., 2025) podendo contribuir para (i) Ampliação da percepção de riscos: instrumentos de ciência cidadã (pluviômetros caseiros, apps de monitoramento) transformam dados locais em conhecimento acionável, catalisando respostas precoces; (ii) Empoderamento e coesão social: processos formativos participativos fortalecem redes de apoio, fundamentais para evacuações seguras e reconstrução pós-evento; (iii) Governança multinível: ao articular escolas, defesas civis, universidades e governos locais, a educação cria canais de comunicação horizontal que potencializam políticas nacionais de adaptação; (iv) Promoção da justiça climática: currículos críticos abordam desigualdades de raça, gênero e território, qualificando decisões que visem proteção de grupos em maior risco (crianças, idosos, populações negras e indígenas).

Os cenários concretos que seguem foram organizados por tipo de impacto e detalhados com local, ações e resultados. Embora sem a intenção de ser uma lista exaustiva, as práticas arroladas visam mostrar que a Educação em Redução de Riscos de Desastres tem impactos mensuráveis em termos de mudança de atitude, construção de saberes, formulação de políticas ou mesmo salvamento de vidas humanas. Apesar de dispersos, os cenários oferecem evidências sólidas para defender a ampliação dessas abordagens em currículos escolares, formação de professores e ações intersetoriais em todo o território nacional.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. D. F., CATALDI, M. (2021). Social and environmental vulnerability in Southeast Brazil associated with the South Atlantic Convergence Zone. *Natural Hazards*, 109(1), 481-503. <https://doi.org/10.1007/S11069-021-04926-Z>
- AIRES, M.; MARTINS, C. L. F.; CURY, G. S. A.; FERNANDES, P. J. F.; OLIVEIRA, J. L. F. Simulação numérica do desastre de origem natural ocorrido em janeiro de 2011 no município de Nova Friburgo, RJ, utilizando o modelo BRAMS. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 65, n. 2, p. 217-235, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG217449994>.
- ALCÂNTARA, E.; MARENGO, J. A.; MANTOVANI, J. E.; LONDE, L. R.; SAN, R. L. Y.; PARK, E.; LIN, Y. N.; WANG, J.; MENDES, T.; CUNHA, A. P.; PAMPUCH, L.; SELUCHI, M.; SIMÕES, S.; CUARTAS, L. A.; GONCALVES, D.; MASSI, K.; ALVALÁ, R.; MORAES, O.; SOUZA FILHO, C.; MENDES, R.; NOBRE, C. A. (2023). Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1157-1188.
- ALLAN, R. P.; SODEN, B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, v. 321, n. 5895, p. 1481-1484, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1160787>.
- ALTAFINI, D.; BRAGA, A. C.; UGALDE, C. Mapping Urban Flood-Prone Areas' Spatial Structure and Their Tendencies of Change: A Network Study for Brazil's Porto Alegre Metropolitan Region. *Cartographica*, v. 58, n. 4, p. 258-275, 2023.
- ALVES, L. G. S.; REIS, F. A. G. V.; GIORDANO, L. C.; NUMMER, A. V. Analysis of the 2022 Petrópolis landslide disaster. *Landslides*, v. 20, n. 10, p. 2287-2307, 2023.
- ANGELINE G. Pendergrass, What precipitation is extreme?. *Science* 360, 1072-1073(2018).DOI:10.1126/science.aat1871
- ARAI, M. (2006). A grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Série Científica*, v. 6, n. 2, 1 – 6.
- AVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A. B.; BROMWICH, D. H.; AMORIM, M. C. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 11, 114029, 2016.
- AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLO, V. H.; JUSTINO, F.; TORRES, R. R.; WILSON, A. B. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, [S. l.], v. 55, n. 5-6, p. 1403, 2020DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- BALLARIN, A.; WENDLAND, E., ZAERPOUR; M.; HATAMI, S.; NETO, A. A. M.; PAPALEXIOU, S. M. (2024). Frequency Rather Than Intensity Drives Projected Changes of Rainfall Events in Brazil. *Earth's Future*, 12(1)

BARICHIVICH, J.; GLOOR, E.; PEYLIN, P.; BRIENEN, R. J. W.; SCHÖNGART, J.; ESPINOZA, J. C.; PATTNAYAK, K. C. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*, [S. l.], v. 4, n. eaat8785, p. 1-7, set. 2018. DOI: 10.1126/sciadv.aat8785

BATTISTI, R.; DAPPER, F. P.; SILVA, A. C. S.; MESQUITA, M.; SILVA, M. V. da; ANDRADE, R. R.; LOPES, A. G. C. Assessing Precipitation Trends Between 1960 and 2021 Using Multiple Trend Indexes in the Goiás State and Federal District, Brazil. *International Journal of Climatology*, [S. l.], v. 45, n. 5, p. e8750, abr. 2025. DOI: 10.1002/joc.8750

BELTRAMIN, K. K.; MORAIS, E. S. Fluvial adjustments due to straightening and inadequate management of urban drainage: the Maringá Stream catchment, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 25, n. 3, p. 45-62, 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Quarta comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF: MCTI, 2020. 57 p. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4782>. Acesso em: 01 ago. 2025

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Brasília, DF: MMA, 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF: MCTI, 2016. Disponível em: <https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4312>.

BONINI, J. E.; ROSS, J. L. S.; MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C. (2021). Escorregamentos rasos em São Luiz do Paraitinga (SP, Brasil) (2009-2010). *Physisterrae*, 2(1), 187-217.

CAMARINHA, P. I. M. ; DEBORTOLI, N. S. ; RODRIGUES, R. . Natural Disasters Caused by Water. In: MCTI - Ministry of Science, Technology and Innovation. (Org.). Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1ed. 2016, v. 2, p. 145-159.

CAMARINHA, P. I. M. Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenários de mudanças climáticas na porção paulista da Serra do Mar. 2016. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.19.03.49/doc/publicacaquatratocomuo.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2025.

CANIL, K.; LAMPIS, A.; SANTOS, K. L. Vulnerability and the social construction of risk: a contribution to planning in the São Paulo Macrometropolis. *Environmental Science & Policy*, v. 108, p. 55-64, 2020.

CINTI, T. M.; MARQUES, M. L. Associação entre suscetibilidade à inundação e desenvolvimento da área urbanizada de Campinas-SP. *Seminário Internacional de Investigação em Urbanismo*, v. 12, n. 2, 2020.

CLARKE, B.; BARNES, C.; RODRIGUES, R.; ZACHARIAH, M.; ALVES, L. M.; HAARSMA, R.; PINTO, I.; YANG, W.; VAHLBERG, M.; VECCHI, G.; IZQUIERDO, K.; KIMUTAI, J.; OTTO, F. E. L. Climate change, El Niño and infrastructure failures behind massive floods in southern Brazil. London: Grantham Institute, Imperial College London, 2024. Disponível em: <https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/>. Acesso em: 07 ago. 2025.

COSTA, J. J. et al. Vulnerabilidades socioambientais à ocupação urbana: uma análise de Blumenau (SC) e Aracaju (SE). *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 14, n. 4, p. 56-75, 2020.

COUTINHO, R.Q.; SILVA, M.M. (2005). “Classificação e Mecanismos de Movimento de Massa”. Conferência. IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Salvador, Bahia.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>.

DALAGNOL, R.; GRAMCIANINOV, C. B.; CRESPO, N. M.; LUIZ, R.; CHIQUE-TTO, J. B.; MARQUES, M. T. A.; et al. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability*, v. 1, n. 1, e15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/CLI2.15>.

DEBORTOLI, N. S. ; CAMARINHA, P. I. M. ; RODRIGUES, R. ; MARENKO, J. A.. Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais no Brasil, no contexto das Mudanças Climáticas. In: Breno Simonini Teixeira; Jose Antonio Marengo Orsini; Márcio Rojas da Cruz. (Org.). Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil. 1ed.Brasília: MCTI, 2016, v. 1, p. 321-386.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENKO, J. A. ; RODRIGUES, R. . An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards* (Dordrecht), v. 85, p. 1-25, 2017.

DREXLER, A. H., & MEISENZAHL, R. (2024). Special issue on climate change and natural disasters. *Journal of Risk and Insurance*, 91(2), 255-261. <https://doi.org/10.1111/jori.12474>

DONAT, M. G.; LOWE, T. R.; ALEXANDER, L. V.; FISCHER, E. M. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, v. 6, p. 508–513, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>.

DOS SANTOS L. O. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; GELI, H. M. E.; QUERINO, C. A. S.; RUHOFF, A. L.; IVO, I. O.; NETO, N. L. Trends in Precipitation and Air Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. *Atmosphere*, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 426, 2023. DOI: 10.3390/atmos14030426.

DOS SANTOS, D. C., SANTOS, C. A. G., BRASIL NETO, R. M., DA SILVA, R. M., & DOS SANTOS, C. A. C. (2023). Precipitation variability using GPCC data and its relationship with atmospheric teleconnections in Northeast Brazil. *Climate Dynamics*, 61(5-6), 2717-2738. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06838-z>

DUNN, R. J. H.; HEROLD, N.; ALEXANDER, L. V.; DONAT, M. G.; ALLAN, R.; BADOR, M.; BRUNET, M.; CHENG, V.; Ibadullah, W. M. W.; Ibrahim, M. K. I. B.; KRUGER, A.; KUBOTA, H.; LIPPmann, T. J. R.; MARENGO, J.; MBATHA, S.; MCGREE, S.; NGWENYA, S.; CAICEDO, J. D. P.; RAMOS, A.; SALINGER, J.; VAN DER SCHRIER, G.; SRIVASTAVA, A.; TREWIN, B.; YÁÑEZ, R. V.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.; JIMÉNEZ, C. V.; VOSE, R.; YUSSOF, M. N. A. B. H.; ZHANG, X. Observed global changes in sector-relevant climate extremes indices: An extension to HadEX3. *Earth and Space Science*, [S. l.], v. 11, p. e2023EA003279, 2024. <https://doi.org/10.1029/2023EA003279>.

EMBERSON, R., KIRSCHBAUM, D., & STANLEY, T. (2021). Global connections between El Niño and landslide impacts. *Nature Communications*, 12(1), 2262.

FERNANDES, L.G.; RODRIGUES, R. R. Changes in the patterns of extreme rainfall events in southern Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1337-1350. 2018

FERREIRA, K.; ABIKO, A. K. Urban Resilience and Landslide Risk Management: The Case of Santos (Brazil). In: *Resilience and Urban Disasters*, p. 245-264. Springer, 2019.

G1. Chuva que caiu em 24 horas no Litoral Norte foi o maior registro da história do Brasil. G1 Globo, 20 fev. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/20/chuva-que-caiu-em-24-horas-no-litoral-norte-foi-o-maior-registro-da-historia-diz-governo-de-sao-paulo.ghtml> Acesso em: 9 ago. 2025.

GIMENO, L., SORÍ, R., VÁZQUEZ, M., STOJANOVIC, M., ALGARRA, I., EIRAS-BARCA, J., GIMENO-SOTELO, L., & NIETO, R. (2022). Extreme precipitation events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 9(6), e1611. <https://doi.org/10.1002/wat2.1611>

GLOOR, M.; BRIENEN, R.J.W.; GALBRAITH, D.; FELDPAUSCH, T.R.; SCHÖNGART, J.; GUYOT, J.-L.; ESPINOZA, J.C.; LLOYD, J.; PHILIPS, O.L. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters* 40: 1729-1733.

- HACKMAN, L., Mack, P., Ménard, H., Behind every good research there are data. What are they and their importance to forensic science, *Forensic Science International: Synergy*, Volume 8, 2024, 100456, ISSN 2589-871X, <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2024.100456>.
- HAMDAN, A., ALHAMAD, I. M., IKEMBA, S., & EWIM, D. R. (2023). Predicting future global temperature and greenhouse gas emissions via LSTM model. *Sustainable Energy Research*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40807-023-00092-x>
- HIRYE, M. C. M.; ALVES, D. S.; FILARDO, A. S.; MCPHEARSON, T.; WAGNER, F. Assessing Landslide Drivers in Social-Ecological-Technological Systems: The Case of Metropolitan Region of São Paulo, Brazil. *Remote Sensing*, v. 15, n. 12, 3048, 2023.
- HUMMELL, B. M. L.; CUTTER, S. L.; EMRICH, C. T. Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 7, n. 2, p. 111-122, 2016.
- IMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNANDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 101, n. 1-2, p. 121-135, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00704-009-0207-9>.
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A. C. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. *Natural Hazards*, v. 113, n. 2, p. 1165-1198, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>.
- MARENGO, J. A.; CAMARINHA, P. I.; ALVES, L. M.; DINIZ, F.; BETTS, R. A. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. *Frontiers in Climate*, [S. l.], v. 3, p. 610433, mar. 2021. DOI: 10.3389/fclim.2021.610433.
- MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J.-C.; FU, R.; JIMENEZ MUÑOZ, J. C.; ALVES, L. M.; DA ROCHA, H. R.; SCHÖNGART, J. Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. *Acta Amazonica*, [S. l.], v. 54, p. e54es22098, 2024. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M. E.; CAMARINHA, P. I.; DOLIF, G.; SPERLING, V. B.; ALCÂNTARA, E. H.; RAMOS, A. M.; ANDRADE, M. M.; STABILE, R. A. & JOSÉ. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, [S. l.], v. 120, n. 8, p. 7997-8024, jun. 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06558-5

MARENGO, J. A.; DOLIF, G.; CUARTAS, A.; CAMARINHA, P.; GONÇALVES, D.; LUIZ, R.; SILVA, L.; ALVALA, R. C. S.; SELUCHII, M. E.; MORAES, O. L.; SOARES, W. R.; NOBRE, C. (2024) O maior desastre climático do Brasil: Chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Estudos Avançados*, 38(112), 203-228.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. Estudo da suscetibilidade à inundação com base em análise geomorfológica, bacia hidrográfica do Arroio Santa Isabel, região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, n. 1, p. 27-42, 2016.

MARTINI, L. C. P. Changes in rainfall patterns in southern Brazil over 1961-2020 period detected by rain gauge data. *International Journal of Climatology*, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 1195-1208, fev. 2022. DOI: 10.1002/joc.7804.

MATTOS, T. S.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRUNO, L. S.; OLIVEIRA, N. D.; VASCONCELOS JÚNIOR, J. G.; LUCAS, M. C. Improving Urban Flood Resilience under Climate Change Scenarios in a Tropical Watershed Using Low-Impact Development Practices. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S. l.], v. 26, n. 12, p. 5021031, dez. 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002143.

MEDEIROS, F. J. de; OLIVEIRA, C. P. de. Assessment of dry and heavy rainfall days and their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, v. 43, n. 9, p. 3927-3948, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7759>.

MORAES, R. B. F. de; GONÇALVES, F. V. Development, Application, and Validation of the Urban Flood Susceptibility Index. *Water Resources Management*, [S. l.], v. 38, p. 2511-2525, 2024. DOI: 10.1007/s11269-024-03782-3

MORAES, O. L. L. (2023a) Proposing a metric to evaluate early warning system applicable to hydrometeorological disasters in Brazil. *Int J Disaster Risk Reduct* 87:103579. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103579>

MORAES, O. L. L. (2023b). An impact-based forecast system developed for hydrometeorological hazards. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 93, 103803. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103803>

MORAES, O. L. L and LACERDA, R. S., The prevalence of objectivist risk in official DRR terminology and a consistent mathematical equation to define it, Interna-

tional Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 104, 2024, 104396, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104396>.

OLIVEIRA, T. G.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, R. M. Propriedades geológico-geotécnicas de um solo coluvionar em encosta natural cortada por uma dutovia. Geociências, v. 38, n. 4, p. 1013-1028, 2020.

ORLANDI SIMÕES, J. V.; ALVES, L. M.; PEDRA, G. U.; et al. Spatio-temporal assessment of extreme precipitation events in southeastern Brazil. Modeling Earth Systems and Environment, v. 11, p. 212, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02396-x>.

OSUTEYE, E., JOHNSON, C., & BROWN, D. (2017). The data gap: An analysis of data availability on disaster losses in sub-Saharan African cities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 26, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.026>

PICANÇO, J. L.; MESQUITA, M. J. M.; SOARES, L. F. The Hydrological Disasters Through Historical Survey in the Serra do Mar Range, Southern Brazil. In: Advancing Culture of Living with Landslides, p. 1007-1014. Springer, 2017.

PILLAR, V. D.; OVERBECK, G. E. A diversidade da vegetação no Sul do Brasil: padrões e processos. In: SIMPÓSIO SOBRE A VEGETAÇÃO DO SUL DO BRASIL, 2024, Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR, 2024. p. 100-115.

PINHO, P.; SILVESTRINI; R. A.; FELLOWS; M.; PEREZ; L. P.; ALENCAR; A.; GUYOT; C.; MOUTINHO; P.; LAPOLA; D. M.; STRINGER, L. C. (2024). Escalating Climate Disasters in the Amazon (2006-2022): Vulnerabilities and Compound Risks. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5045887/v1>

PINTO, T. A. C.; MATTOS, E. V.; REBOITA, M. S.; SOUZA, D. O. D.; ODA, P. S. S.; MARTINS, F. B.; BISCARO, T.; FERREIRA, G. W. D. S. Synoptic and mesoscale atmospheric patterns that triggered the natural disasters in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil, in January 2020. *Atmosphere*, v. 16, n. 1, p. 102, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16010102>.

PUGAS, A. F.; SILVA, A. P. B.; SILVA, E. B.; ROLDAO, H. P.; QUADRO, M. F. L.; VITOR, A.; MUZA, M. N. Analysis of Temporal Precipitation Variability in the State of Santa Catarina-Brazil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 34, p. 51-78, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17164>.

RAMOS, C. M.; TORRES, A. P.; PEREIRA, I. N. A.; FROTA, C. A. Geotechnical Characteristics of Mass Movements in Manaus - AM. *International Journal for Innovation Education and Research*, [S. l.], v. 7, n. 12, p. 15-25, 2019. <http://dx.doi.org/10.31686/ijier.Vol7.Iss12.1838>

RODRIGUES, R. R.; MARINHO, D. F.; MATTOS, M. L. A. Impactos climáticos e variabilidade dos eventos extremos no Sul do Brasil. *Climatologia Brasileira*, v. 34, n. 2, p. 45-60, 2018.

- SAITO, S. M. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 30, n. 2, p. 227-251, 2018.
- SANTANA, R. A.; TOTA, J.; SANTOS, R. M.; VALE, R. S. Jatos de baixos níveis no sudoeste da Amazônia. *Ciência e Natura*, v. 35, n. 2, p. 57-66, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X11684>.
- SANTOS. Plano de Ação Climática de Santos (PACS). Santos, SP: Prefeitura Municipal de Santos, 2022. Disponível em: https://www.adaptacao.eco.br/_biblioteca/plano-de-acao-climatica-de-santos-pacs-relatorio-completo/. Acesso em: 25 jul. 2025.
- SANTOS, D. J. dos; PEDRA, G. U.; SILVA, M. G. B. da; JÚNIOR, C. A. G.; ALVES, L. M.; SAMPAIO, G.; MARENKO, J. A. Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C. *Sustainability in Debate-Brasilia*, Brasília, v. 11, n. 3, p. 57-73, dez. 2020. DOI: [10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933](https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933)
- SEIGERMAN, C. K., LEITE, N. S., MARTINS, E. S. P. R., & NELSON, D. R. At the extremes: Assessing interrelations among the impacts of and responses to extreme hydroclimatic events in Ceará, Northeast Brazil. *Journal of Hydrology*, 630, 130850. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130850>
- SILVA, J. F. M.; OBESO, M. P.; MAKRAKIS, M. C.; MAKRAKIS, S. Environmental analysis of land use and occupation in nine watersheds contributing to the Iguaçu River, Brazil. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 13, e34868, 2022.
- SIQUEIRA, J. R.; MARQUES, V. S. Case study of intense mesoscale convective systems occurred between 02 and 03 January 2013 in the state of Rio de Janeiro: Structural and thermodynamic characteristics. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 2, p. 57-76, 2016. DOI: https://doi.org/10.11137/2016_2_57_76.
- SOUZA, C. M. M. et al. Social environmental vulnerability approach on the COVID-19 epoch: a case study in Blumenau (SC), Brazil. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, e239101018739, 2021.
- SOUZA, D. C.; CRESPO, N. M.; SILVA, D. V.; HARADA, L. M.; GODOY, R. M. P.; DOMINGUES, L. M.; LUIZ, R.; BORTOLOZO, C. A.; METODIEV, D.; ANDRADE, M. R. M.; HARTLEY, A. J.; ABREU, R. C.; LI, S.; LOTT, F. C.; SPARROW, S. (2023). Extreme rainfall and landslides as a response to human-induced climate change: a case study at Baixada Santista, Brazil, 2020. Research Square. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06621-1>
- STOTT, Peter A.; CHRISTIDIS, Nikolaos; OTTO, Friederike E. L.; SUN, Ying; VANDERLINDEN, Jean-Paul; VAN OLDENBORGH, Geert Jan; VAUTARD, Robert; VON STORCH, Hans; WALTON, Peter; YIOU, Pascal; ZWIERS, Francis W. Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 23-41, 2016. DOI: [10.1002/wcc.380](https://doi.org/10.1002/wcc.380).

- STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R. G. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20 °S. *Deep-Sea Research*, v. 37, n. 12, p. 1875-1886, 1990. DOI: 10.1016/0198-0149(90)90083-8.
- TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J.; SMITH, L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dynamics*, v. 20, n. 7, p. 741–758, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-002-0300-7>.
- VIEIRA, B. C.; SOUZA, L. M.; ALCALDE, A. L.; DIAS, V. C.; BATEIRA, C.; MARTINS, T. D. Debris flows in southeast Brazil: susceptibility assessment for watersheds and vulnerability assessment of buildings. Universidade de Lisboa, 2019.
- VINCENT, L. A. et al. Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of South America 1960–2014. *Journal of Climate*, v. 33, n. 21, p. 9499-9513, 2020. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-1012.1.
- WANG, X.-Y.; LI, X.; ZHU, J.; TANAJURA, C.A.S. 2018. The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environmental Research Letters* 13: 94015. doi:10.1088/1748-9326/aadbb9
- WORLD WEATHER ATTRIBUTION. Rapid attribution analysis of extreme weather events. 2023. Disponível em: <https://www.worldweatherattribution.org/>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- BRANCO, EVANDRO ALBIACH; JESUS, FERNANDA SANTOS MOTA DE; PAZ, MARIANA GUTIERRES ARTEIRO DA; RAYMUNDO, MARIA HENRIQUETA ANDRADE. Educação Ambiental e Sustentabilidades Outras. *Revista Territorial*, Goiás, outras, p. 26–55, 2025. Dossiê: Educação Ambiental e Sustentabilidades Outras. ISSN: 2317-0360.
- BRASIL. Educação em clima de riscos de desastres / Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. – reimpr. rev. – São José dos Campos, SP: Cemaden, 2024.
- BRASIL. Presidência da República. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular . São Paulo: Fundação Carlos Alberto Vanzolini, 2018
- MARCHEZINI, V., SAITO, S. M., LONDE, L. R., & DAMACENA, F. D. L. (2025). Implementation challenges of disaster risk management policies: The organizational capacities of municipal civil defense units. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 119, 105291.
- MATSUO, P. M., & SILVA, R. L. F. (2021). Desastres no Brasil? Práticas e abordagens em educação em redução de riscos e desastres. *Educar em Revista*, 37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-4060.78161>.
- MATSUO, P. M. (2023). Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres. Coimbra: RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 159 p. DOI: https://doi.org/10.34037/978-989-9053-17-5_04

ONU - Organização das Nações Unidas. (2015). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 07 Ago. 2025.

RICHARDSON, K., STEFFEN, W., LUCHT, W., BENDTSEN, J., CORNELL, S. E., DONGES, J. F., ... & ROCKSTRÖM, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.

RIO GRANDE DO SUL. Comitê Gestor do Plano Rio Grande. Resolução nº 05/2025, de 1º de julho de 2025. Dispõe sobre as iniciativas encaminhadas pelas secretarias finalísticas à Secretaria da Reconstrução Gaúcha, visando a inclusão na carteira do Plano Rio Grande, Programa de Reconstrução, Adaptação e Resiliência Climática do Estado do Rio Grande do Sul. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul: Caderno do Governo, Porto Alegre, p. 13, 1 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1286178>>. Acesso em: 9 ago. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. Lei Complementar Nº 16.263, de 27 de Dezembro de 2024. Institui a Política Estadual de Proteção e Defesa Civil - PEPDEC. 2024. Disponível em: <https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1181541>. Acesso em: 30 jul. 2025.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å., CHAPIN III, F. S., LAMBIN, E., ... & FOLEY, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).

SULAIMAN, S. N.; TRAJBER, R.; MATSUO, P. M.; FERREIRA, K. UM CAMINHO ESTRATÉGICO Educação e engajamento social na construção de comunidades e cidades resilientes. GIRD+10: Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos e Desastres. Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021(143-151p.)

TRAJBER, Rachel; BRIANEZI, Thaís; BIASOLI, Semíramis. (Coord.). Diretrizes de Educação Ambiental Climática. FunBEA, ICS - Instituto Clima e Sociedade, Cemaden Educação. 2024 (versão eletrônica). Disponível em: <https://educacao.cemaden.gov.br/midiateca/diretrizes-de-educacao-ambiental-climatica/>. Acesso em: 14 ago. 2024.

UNDRR Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres 2015-2030
<https://www.unrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

UNISDR, Marco de Ação de Hyogo 2005-2015: aumento da resiliência das nações e das comunidades frente aos desastres.

WISNER, BEN & BLAIKIE, PIERS & CANNON, TERRY & DAVIS, IAN. (2004). At Risk: Natural Hazards.