

5. O PAPEL CENTRAL DA ÁGUA NA RESILIÊNCIA E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS

Suzana Maria Gico Lima Montenegro¹³, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes¹⁴, Dirceu Silveira Reis Junior¹⁵, Eduardo Mario Mendiondo¹⁶, Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins¹⁷, Francisco de Assis Souza Filho¹⁷, Pedro Borges Chaffé¹⁸, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹⁹, Rosa Maria Formiga Johnsson²⁰, Saulo Aires de Souza²¹, Walter Collischonn¹⁹

INTRODUÇÃO

O ciclo Hidrológico compõe o mecanismo dinâmico mais ativo dos ecossistemas, exercendo papel integrador entre atmosfera, o solo, o subsolo e as águas de superfície. Assim, os efeitos potenciais de mudanças climáticas produzem impactos de ordem social, econômica e ambiental. A água, em particular os rios, é o verdadeiro termômetro da qualidade ambiental e os impactos inerentes ganham uma dimensão que requer uma

13 Agencia Pernanbucana de Água e Clima - APAC, Recife, PE.

14 Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, PR.

15 Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF.

16 Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP.

17 Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCENAME, Fortaleza, CE.

18 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC.

19 Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS.

20 Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

21 Agência Nacional de Água - ANA, Brasília, DF

Autora correspondente: suzana.montenegro@apac.pe.gov.br

nova visão de planejamento, ações e interações, em especial com a Sociedade. Cabe destacar que, ao passo que a ciência do Clima clama por mitigação de emissões de gases de efeito estufa, a ciência da Água na superfície, estrategicamente, foca na defesa de estratégias de adaptação. Enquanto a mitigação eficiente das mudanças climáticas necessita de uma visão e acordo global, a adaptação depende do conhecimento local sobre a gestão da água.

Adicionalmente, a variabilidade hidrológica tem peculiaridades diferentes da variabilidade climática, apesar da natural integração entre ambas. Os ecossistemas se equilibram em ciclos até o limite da ação antrópica, que provoca impactos induzindo um novo componente às condições de variabilidade temporal e espacial que caracterizam processos hidrológicos. Essas mudanças geram incertezas com claros efeitos sobre estacionariedade, homogeneidade, independência e aleatoriedade de séries observacionais, afetando o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Assim, enquanto o clima nos informa sobre possíveis mudanças nas chuvas e na evaporação, a gestão dos recursos hídricos requer principalmente compreender como a água é armazenada e transportada após chegar ao continente, o que depende das condições locais (características naturais das bacias hidrográficas) e também das modificações feitas pela sociedade, como o uso da terra e a construção de estruturas hidráulicas.

Neste contexto, os efeitos das mudanças climáticas e a intensificação de eventos extremos, combinados com as ações de ocupação inadequada de uso da terra, desmatamento sem planejamento para expansão de fronteiras agrícolas, falta de saneamento básico, atividades rurais insustentáveis, degradação ambiental de práticas inadequadas de mineração, entre outros fatores, resultam em desastres naturais de grande magnitude, com impactos sociais, econômicos e ambientais significativos, como mortes, destruição de infraestrutura e paralisação de atividades econômicas. Os impactos das mudanças climáticas já são sentidos na escala local, intensificando especialmente desastres relacionados a secas e cheias.

O Brasil abriga cerca de 12% da água doce superficial do planeta (ANA, 2022), mas essa disponibilidade é distribuída de forma desigual. Aproximadamente 80% das vazões médias anuais estão na Bacia Amazônica, onde vive menos de 5% da população nacional (ANA, 2022; IBGE, 2023). Regiões densamente povoadas, como o Sudeste, têm disponibilidade per capita bem abaixo da média nacional. Em áreas do semiárido, o

balanço hídrico tende a ser negativo, pois a recarga natural, limitada pela baixa precipitação e alta evapotranspiração, frequentemente é inferior à demanda, sobretudo em áreas de uso intensivo. Essas situações têm levado à redução de vazões ecológicas, à sobre-exploração de aquíferos e à degradação da qualidade da água.

Outros problemas de grande magnitude incluem a poluição difusa e pontual, a degradação de nascentes e matas ciliares e a baixa eficiência no uso da água. A agricultura responde por cerca de 70% das retiradas no país (ANA, 2021). Aproximadamente 45% do esgoto gerado não recebe tratamento adequado (SNIS, 2022), agravando a poluição dos corpos hídricos. O uso inadequado da terra e a supressão de vegetação nativa comprometem a infiltração, aumentam o escoamento superficial e reduzem a resiliência das bacias.

Além disso, eventos hidrológicos extremos se tornaram mais frequentes e intensos. Entre os episódios recentes de seca mais severos, o CEMADEN (2024) destaca: a seca prolongada no Nordeste (2012–2017); eventos no Sudeste (2014–2015, 2017–2018, 2023–2024); no Pantanal (2020–2024); e no Sul do Brasil (2020–2023). Crises hídricas urbanas, como a do Sistema Cantareira em 2014–2015, expuseram vulnerabilidades do abastecimento de metrópoles. A Amazônia registrou estiagens severas em 2005, 2010, 2015–2016, 2023–2024 (CEMADEN, 2024). No caso de inundações, podemos citar o megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro (2011), as cheias em Petrópolis (2022) e na Região Metropolitana do Recife (2022), além das inundações históricas do Rio Grande do Sul em 2024, que atingiram centenas de municípios e evidenciaram a gravidade crescente dos desastres associados às mudanças do clima no Brasil.

Essa combinação de pressões climáticas, ambientais e socioeconômicas exige uma governança das águas adaptativa, baseada em monitoramento, planejamento integrado e gestão de riscos (ANA, 2022; PBMC, 2022). O setor de Recursos Hídricos do Brasil possui uma vasta experiência acumulada, que vai além do domínio técnico e científico, abrangendo também a complexa interface dos processos hidrológicos com os aspectos legais e institucionais. Essa dimensão foi materializada de forma estruturante pela Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e consolidou princípios de descentralização, participação social e gestão integrada. A partir desse marco legal, o país avançou em uma abordagem multi e interdisciplinar, capaz de integrar conhecimento, governança e prática. Esse conjunto de competências torna

o Brasil uma referência em planejamento e gestão de recursos hídricos voltados à adaptação, ao desenvolvimento sustentável e à resiliência, tendo como missão oferecer elementos de suporte à decisão e subsídios consistentes para políticas de Estado com impacto concreto na sociedade.

Este capítulo apresenta um panorama dos impactos das mudanças climáticas sobre a dinâmica hidrológica no Brasil, articulando evidências científicas com práticas e desafios para a gestão de recursos hídricos. Destaca implicações para políticas públicas e explora estratégias de adaptação e resiliência voltadas para a segurança hídrica do país.

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL E SEGURANÇA HÍDRICA-CONTEXTUALIZAÇÃO

A gestão de Recursos Hídricos no Brasil iniciou de forma mais sistêmica com a Lei das Águas, Lei 9.433/1997, que estabelece a PNRH, com diretrizes, objetivos e instrumentos para a gestão da água no Brasil, e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), com o arcabouço institucional para a efetivação da Política. A lei busca garantir o uso múltiplo, racional e sustentável da água, assegurando sua disponibilidade para as presentes e futuras gerações. As diretrizes da PNRH preveem a gestão participativa, com a participação do poder público, dos usuários de água e da sociedade nas tomadas de decisão.

A Lei das Águas estabeleceu como fundamento o respeito aos usos múltiplos e como prioridade o abastecimento humano e dessedentação animal em casos de escassez. O acompanhamento da evolução da gestão dos recursos hídricos em escala nacional é feito por meio da publicação do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos, que a cada quatro anos faz um balanço da implementação dos instrumentos de gestão, dos avanços institucionais do Sistema e da conjuntura dos recursos hídricos no País. Ao longo desse tempo, desde a criação das bases da política, muito se evoluiu a nível federal e nos estados, e com criação de mecanismos regionais específicos para lidar com potenciais situação de conflito pelo uso da água, como a alocação negociada de água no Nordeste. Também ao longo desses últimos anos, além dos desafios de consolidação da política e do sistema de gerenciamento, surgiram agendas mundiais que se conectam à questão da água e do clima.

Construída de forma participativa pelas experiências acumuladas desde a edição do Relatório Nosso Futuro Comum (ONU, 1991), a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, editada pela Organização das Nações Unidas em setembro de 2015, consolida o que há de mais avançado em sustentabilidade, fixando 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a serem concretizados por países desenvolvidos e em desenvolvimento. Dentro deste contexto, os últimos 25 anos de pesquisas, avanços e ferramentas tecnológicas alertaram para os impactos das mudanças climáticas.

Em outra frente, dentre várias definições propostas (Vörösmarty et al., 2018; Singh, 2017; UN, 2015, Cook e Bakker, 2012), o conceito de segurança hídrica vai além do mero equilíbrio entre a disponibilidade hídrica e demanda hídrica, tendo como denominador comum a disponibilidade e o acesso a quantidade e qualidade de água adequadas para a população e as atividades econômicas, além de um nível aceitável de risco devido aos impactos hidrometeorológicos extremos e à deterioração ambiental (Moura et al, 2020; Arreguin-Cortes et al., 2019; Jepson et al, 2017; Lall et al., 2017).

O conceito de 'water security' definido pela UNESCO é "the capacity of a population to safeguard access to adequate quantities of water of acceptable quality for sustaining human and ecosystem health on a watershed basis, and to ensure efficient protection of life and property against water related hazards – floods, landslides, land subsidence and droughts" (UNESCO-IHP, 2012); este conceito, portanto, coloca diversas dimensões em conjunto com a questão da água. Uma outra definição foi introduzida por Scott et al. (2013), incorporando a dimensão de resiliência: 'Water security constitutes the sustainable availability of adequate quantities and qualities of water for resilient societies and ecosystems in the face of uncertain global change. A inclusão da dimensão da resiliência permite que a interativa e acoplada dinâmica sociedade-meio ambiente possa reverter um quadro de insegurança hídrica e adequar uma eventual interpretação do caráter não dinâmico da definição.

Beek e Arriens (2014) reforçam que a SH pode ser compreendida como o objetivo principal da Gestão Integrada de Recursos Hídricos, base para estratégias de adaptação para o enfrentamento de mudanças climáticas. Tais conceitos, porém, abrigam intensa complexidade quanto à sua aplicação prática, tendo em vista que os múltiplos usos e demandas por

água desafiam a capacidade dos sistemas de governança em oferecer respostas (Ribeiro e Formiga-Johnsson, 2018).

No Brasil, a segurança hídrica é um dos grandes desafios no cenário nacional, considerando suas múltiplas dimensões com relação aos aspectos econômicos, da sociedade, do clima e dos ecossistemas, além da infraestrutura hídrica.

Na esfera nacional, faz-se importante destacar o papel do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), lançado em 2019, fruto de parceria entre a ANA e o então Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). O PNSH se configura como iniciativa inédita no país e se alinha com os conceitos internacionais de SH, visando, entre outros, assegurar “um planejamento integrado e consistente de infraestrutura hídrica com natureza estratégica e relevância regional, até o horizonte de 2035, para redução dos impactos de secas e cheias” (ANA, 2019a). O PNSH concebeu o Índice de Segurança Hídrica (ISH), com o intuito de “retratar, com simplicidade e clareza, as diferentes dimensões da segurança hídrica, incorporando o conceito de risco aos usos da água” (ANA, 2019a).

Faz-se necessário, ainda, consolidar “base científica das mudanças ambientais globais; impactos, adaptação, vulnerabilidade, mitigação, e esforços de inovação tecnológica em modelos do sistema climático, geo-sensores e sistema de prevenção de desastres naturais”. O legado científico trouxe em evidência questão de extremos e os impactos para áreas prioritárias como: (i) Agricultura: no contexto de segurança alimentar; (ii) Saúde: no contexto de vulnerabilidade ambiental a espalhamento de doenças relacionadas ao clima e extremos climáticos; (iii) Desenvolvimento urbano: no contexto de extremos climáticos e desastres naturais, as dimensões humanas e seus impactos na infraestrutura física: moradia, rodovias, ferrovias, sistemas de água e esgoto, portos, transporte público, desenvolvimento de cidades mais resilientes e redução de risco de desastres naturais; (iv) Fontes alternativas de energias renováveis: no contexto de segurança energética e hídrica e (v) Tecnologia da informação e comunicação: no contexto de uma comunicação mais eficaz e abrangente do tema mudanças globais para a sociedade e governo, visando à definição de políticas públicas ambientais.

É dentro deste escopo que se destaca uma reflexão mais aprofundada sobre segurança hídrica e gestão adaptativa, conceitos perceptíveis, fortes, mas que requerem uma abordagem científica adequada. Entende-se a necessidade de uma reflexão e com o propósito de contribuir

para a instauração de um paradigma de inovação colaborativa no Brasil, estimulando o estreitamento das relações entre Universidade e Empresas Públicas e Privadas e a interação entre os mais diferentes componentes do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação - SNCTI, e se inserindo no contexto da PNRH Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Ela orienta o SNCTI a buscar soluções para os grandes desafios sociais, ambientais e econômicos, contribuindo para a construção das bases do desenvolvimento sustentável do País no contexto de gestão adaptativa.

AVANÇOS DO CONHECIMENTO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Mudanças no período histórico (distante e recente)

As mudanças no clima e no uso da terra e o aumento do consumo de água têm afetado os padrões de disponibilidade hídrica em todo o mundo. No hemisfério sul, por exemplo, essas mudanças resultaram em uma redução de 20% da disponibilidade hídrica média em 20 anos (Blöschl & Chaffé, 2023). Para entender como as mudanças na disponibilidade atmosférica (chuva e evaporação) são traduzidas em mudanças na parte terrestre do ciclo (armazenamento e vazão), é necessário a análise de base de dados hidrológicos consistentes e de características físicas de bacias hidrográficas (e.g., CAMELS-BR; Chagas et al., 2020) além de estudos de modelagem em diversas escalas que reportem a evidência de mudanças nos recursos hídricos (Borges & Chaffé, 2019). No Brasil, nas últimas quatro décadas, houve uma redução significativa das vazões em 40% do território, alinhada com a diminuição da chuva e também com o aumento do consumo para atividades humanas (Figura 1; Chagas et al., 2022a).

Porém, a mudança nas vazões nem sempre é alinhada às mudanças na disponibilidade hídrica média atmosférica. Em algumas regiões, houve um aumento significativo tanto das cheias quanto das secas em 30% do território – o dobro do que seria esperado normalmente. Essa intensificação de parte terrestre do ciclo é resultado não apenas da intensificação do regime de chuvas, mas também de alteração nos mecanismos de armazenamento e fluxo de água e nos usos para diversas atividades humanas (Chagas et al., 2022a). Apesar dos avanços recentes no enten-

dimento da hidrologia brasileira, ainda precisamos melhorar a atribuição dos principais mecanismos de mudanças nas cheias e secas e seus impactos (Paiva et al., 2020).

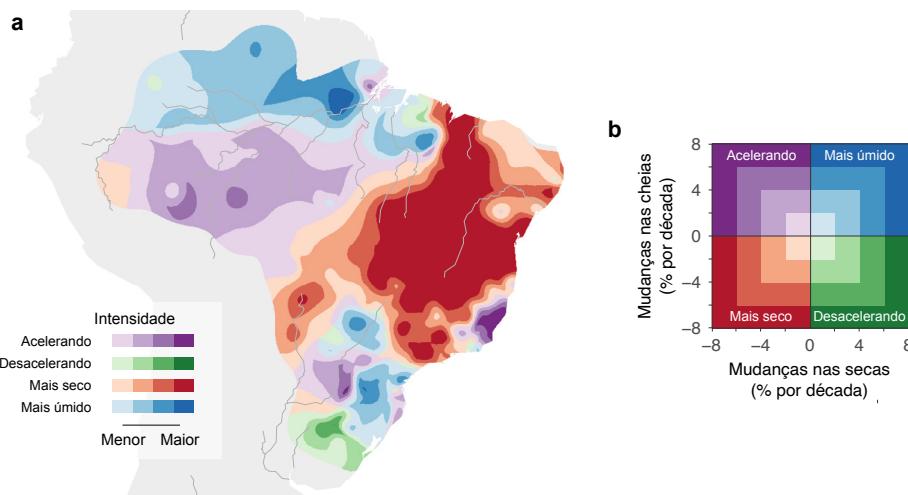


Figura 1: Distribuição espacial das mudanças no regime hidrológico do Brasil (Chagas et al., 2022).

Projeções das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos

Os estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima - IPCC (Arias et al., 2021) apresentam evidências de como as mudanças climáticas antropogênicas, causadas por emissões de gases de efeito estufa (GEE), resultam no aquecimento da atmosfera e consequentemente, em alterações no regime de chuvas, na disponibilidade hídrica e na frequência e magnitude de eventos hidrológicos extremos. Neste sentido, as ações em busca de melhor segurança hídrica, gestão de riscos, resiliência a eventos hidrológicos extremos e adaptação à mudança climática requerem a avaliação de cenários e projeções acerca das condições hidrológicas futuras.

As mudanças climáticas podem causar alterações nas trocas de água entre a atmosfera e as bacias hidrográficas, como no volume total de chuva e sua distribuição sazonal, nas chuvas intensas e na evapotranspiração potencial. Entretanto, uma mesma alteração nessas variáveis pode impactar de formas diferentes a disponibilidade hídrica, as cheias e as

estiagens, a depender de controles locais exercidos pelas próprias bacias hidrográficas. Sendo assim, é necessário desenvolver projeções regionalizadas de potenciais alterações hidrológicas.

Inúmeros estudos têm sido desenvolvidos para compreender o impacto da mudança climática sobre os recursos hídricos brasileiros (e.g. Brêda et al. 2020, Brêda et al. 2023, Sorribas et al. 2016, Borges de Amorim et al. 2020, Petry et al. 2025, Paiva et al. 2024, Miranda et al. 2025). As projeções de alterações são normalmente desenvolvidas com base em resultados de modelos climáticos globais (GCMs) do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). São avaliadas variáveis como precipitação, temperatura, radiação solar, temperatura e umidade do ar. E são considerados possíveis cenários de emissões de gases de efeito estufa. Estas projeções climáticas são utilizadas para forçar modelos hidrológicos (e.g. Modelo de Grandes Bacias MGB), capazes de simular computacionalmente o ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas e rios. Por fim, são comparadas as projeções das condições hidrológicas das próximas décadas até o final do século com o histórico das décadas mais recentes.

Conforme as projeções atuais, espera-se que o volume de precipitação seja reduzido em grande parte do Brasil, incluindo a Amazônia, Cerrado e partes do nordeste. É esperado que a precipitação média aumente apenas na região Sul. Em função do aumento da temperatura do ar, a evapotranspiração potencial pode aumentar na maior parte do Brasil. Consequentemente, a disponibilidade hídrica e vazão média dos rios pode se reduzir na maior parte do Brasil, com alterações superando 50% na região amazônica.

Conforme as projeções, é esperado um aumento nas chuvas intensas de curta duração (por exemplo 1 dia) em praticamente todo o Brasil. O aumento nas chuvas intensas traz preocupações sobre a intensificação de cheias em bacias pequenas e alagamentos em áreas urbanas.

Em relação às cheias em rios de médio a grande porte, causadores de grandes inundações, são projetados aumentos nas vazões máximas na região sul, incluindo Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, e em partes do nordeste brasileiro. Pode ocorrer aumento na magnitude das vazões máximas superiores a 20%. Isto poderia causar acréscimos da ordem de 3 metros no nível d'água máximo em rios de regiões de serra (equivalente a 1 andar de uma edificação) e 50cm a 1 m em regiões planas. A área inundada e população afetada seria maior, podendo haver maior destruição por escoamento com maior velocidade e profundidade d'água.

Este cenário também ameaça a segurança da infraestrutura hídrica como reservatórios, estruturas de proteção contra cheias, sistemas de drenagem, rodovias, etc. Além disso, as cheias extremas podem se tornar até 5x mais frequentes. Isso significa que, por exemplo, um evento extremo que atualmente ocorre, em média, a cada 50 anos, no futuro poderia ocorrer, em média, a cada 10 anos, aumentando seus impactos negativos.

Por outro lado, é esperada a redução de cheias nos grandes rios do centro do Brasil e partes da Amazônia, causado pelo aumento das perdas d'água por evapotranspiração e redução da umidade do solo antecedente ao período de cheia. Como resultado, pode ocorrer a redução na extensão e frequência de inundação em áreas úmidas como a Amazônia e Pantanal, comprometendo a manutenção de importantes ecossistemas.

São esperadas alterações nas secas no território brasileiro. As projeções apontam para um prolongamento e intensificação da estação seca. Na maior parte das regiões do Brasil pode ocorrer aumento do número consecutivo de dias sem chuva, com destaque para a Amazônia, Nordeste e Centro-Oeste brasileiro. Nestas mesmas regiões são esperadas condições climáticas mais áridas.

As mudanças climáticas devem impactar as vazões mínimas dos rios, responsáveis por manter usos d'água e ecossistemas em períodos de estiagens. As vazões mínimas devem se reduzir na maior parte do Brasil, com alterações chegando a mais de 50% no sul da Amazônia e partes do Nordeste. Pode ocorrer aumento do grau de intermitência (rios totalmente secos) na região Nordeste. Além disso, espera-se um aumento da duração de períodos de escassez hídrica (até 2 meses) em que a vazão disponível no rio é menor que a atualmente utilizada como referência no planejamento dos usos d'água.

Águas subterrâneas

Naturalmente mais protegidas do que as águas superficiais, as águas subterrâneas apresentam características de maior resiliência à variabilidade climática, de forma geral, e também às mudanças climáticas, e também são mais protegidas de contaminação. No entanto, uma vez afetadas, tanto pelos aspectos de quantidade, como de qualidade, as águas subterrâneas são de mais difícil recuperação. A comunicação científica recente destaca esses aspectos (Schroeter et al. 2025). O estudo destaca que extremos hidroclimáticos, além de afetar a recarga das águas sub-

terrâneas, podem afetar sua qualidade. As alterações na recarga podem trazer impactos na diminuição capacidade de armazenamento nos aquíferos e disponibilidade de águas subterrâneas. O possível decréscimo de disponibilidade de águas superficiais em algumas regiões pelo efeito das mudanças climáticas pode também aumentar a pressão sobre as águas subterrâneas, que em condições de superexploração, e com condições de recarga alteradas, tende a interferir sobremaneira nas reservas explotáveis. Pesquisa realizada no Brasil ressalta essas questões, considerando projeções com cenários de alterações climáticas em horizontes futuros e os impactos na recarga natural de águas subterrâneas em diferentes regiões (Hirata et al., 2025).

Além disso, os aquíferos costeiros podem sofrer o impacto do aumento do nível do mar, combinado com superexploração e diminuição da recarga natural, e torná-los mais vulneráveis a ocorrência da intrusão salina, quando a água salgada passa a se misturar com água doce e alterar padrões de qualidade das águas subterrâneas.

Além disso, há estudos que alertam que rios brasileiros apresentam risco de redução de vazões devido ao fluxo da água em direção aos aquíferos (Uchôa et al., 2024), devido a condições climáticas e à intensa atividade agrícola. O estudo destaca como áreas especialmente críticas a bacia do rio São Francisco e a região do MATOPIBA, que abrange os Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, ambas muito dependentes de águas subterrâneas para irrigação e abastecimento humano.

PLANEJAMENTO CLIMÁTICO NACIONAL E RECURSOS HÍDRICOS

O relatório “Aplicação da Ferramenta Water Resilience Tracker para o Planejamento Climático Nacional” (CEPAS et al, 2024), elaborado pela ANA em parceria com AGWA, BID e CEPAS/UFC, marca uma iniciativa pioneira no contexto brasileiro para avaliar de forma estruturada como a resiliência hídrica tem sido incorporada nos principais instrumentos de planejamento climático e setorial. A partir de uma metodologia inovadora de análise de conteúdo, com apoio de inteligência artificial, foram examinados oito documentos estratégicos: a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) do Brasil (o país apresentou sua primeira NDC em 2016 e atualizou em 2023, ambas analisadas no relatório), brasileira, o Plano Nacional de Adaptação (PNA) (BRASIL/MMA, 2016), o

Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL/MIDR, 2022), o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) (BRASIL/ANA, 2019), o Plano ABC+ (agropecuária) (BRASIL/MAPA, 2021), o PLANSAB (saneamento) (BRASIL/SNS-MIDR, 2019), o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) (BRASIL/MME, 2022) e o Plano Nacional de Defesa Civil (PNDC) (BRASIL/MIDR, 2024). A análise foi estruturada em quatro grandes dimensões: (i) presença da água nos planos climáticos; (ii) governança e planejamento adaptativo; (iii) conexões com setores usuários de água; e (iv) financiamento climático e implementação de projetos.

Os resultados revelam avanços importantes, especialmente no PNRH e no Plano ABC+, que se destacam por reconhecerem a água como elemento estratégico diante da mudança do clima. O PNRH incorpora cenários climáticos e diretrizes voltadas à gestão de riscos hídricos, sendo o documento mais bem avaliado na dimensão “água nos planos climáticos”. O PNA também apresenta contribuições relevantes, ao articular resiliência hídrica com segurança alimentar e abastecimento humano. Em contraste, planos como o PLANSAB e o PNDC demonstram baixa integração entre os desafios climáticos e as políticas de gestão da água, o que indica uma necessidade urgente de revisão e alinhamento.

Na dimensão de governança e planejamento adaptativo, o PNRH novamente se sobressai, apresentando marcos legais que favorecem abordagens flexíveis e interativas. O ABC+ também avança ao propor mecanismos de adaptação no setor agropecuário. Já o PNSH, apesar de sua importância estratégica, apresenta baixa articulação entre segurança hídrica e adaptação climática. A NDC brasileira, por sua vez, enfatiza compromissos internacionais, mas ainda carece de instrumentos internos eficazes para integrar a água em sua governança.

A análise das conexões com setores estratégicos revela que, embora o setor agropecuário (ABC+) apresenta diretrizes importantes para o uso eficiente da água, sobretudo na irrigação, há fragilidades em outros setores. O PLANSAB e o PNSH, por exemplo, carecem de estratégias claras para a alocação de água em situações de escassez. Nesse ponto, destaca-se a importância de diretrizes que permitam ajustes dinâmicos nos direitos de uso da água, em função de variações sazonais e projeções climáticas.

A análise do setor energético, representado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), mostra avanços pontuais, mas ainda insuficientes. Embora o PDE reconheça os riscos climáticos para a segurança

energética e mencione a necessidade de diversificação da matriz, ele carece de uma abordagem mais estruturada para integrar a resiliência hídrica ao planejamento do setor elétrico. A dependência da matriz hidrelétrica exige maior articulação entre os cenários hidrológicos e energéticos, sobretudo frente à variabilidade crescente das vazões. Essa lacuna limita a capacidade do PDE de antecipar e responder a eventos críticos, como secas prolongadas e estiagens severas, que têm impacto direto na geração de energia e na segurança do sistema.

Na dimensão do financiamento climático, o relatório identifica uma lacuna expressiva na maior parte dos planos. Apenas o ABC+ e o PNRH mencionam, ainda que de forma incipiente, fontes como o Fundo Verde para o Clima e estratégias de mobilização de recursos por meio de parcerias público-privadas. Os demais planos não detalham mecanismos de financiamento ou critérios técnicos compatíveis com os requisitos das instituições financeiras internacionais. Essa ausência compromete a viabilidade de implementação das medidas propostas e dificulta o acesso a recursos disponíveis para adaptação climática. A análise destaca, portanto, a necessidade de desenvolver estratégias financeiras mais robustas, alinhadas com a realidade dos diferentes setores e regiões.

Transversalmente, o relatório aponta como críticas a fragmentação entre políticas públicas, a baixa articulação entre os níveis de governo e a insuficiente integração entre agendas — como água, agricultura, energia, saneamento e defesa civil. O *Water Resilience Tracker* evidencia também a importância de incorporar ferramentas baseadas em evidências, como projeções hidroclimáticas, sistemas de alerta e indicadores de vulnerabilidade, de forma mais sistemática e padronizada. Apenas alguns documentos, como o PNRH e o PNA, demonstram avanços nesse sentido. A maioria ainda carece de metodologias robustas para lidar com incertezas e orientar a tomada de decisão em ambientes de risco crescente.

Por fim, o relatório reforça o potencial da ferramenta *Water Resilience Tracker* como uma metodologia replicável para futuros ciclos de avaliação e aprimoramento contínuo das políticas públicas. A experiência revela a importância de posicionar a água como eixo estruturante do planejamento climático nacional, fortalecendo a governança orientada à resiliência e à adaptação sustentável. O estudo oferece um diagnóstico valioso e recomendações estratégicas para que o Brasil avance na construção de políticas climáticas e hídricas mais integradas, eficazes e preparadas para os desafios do século XXI.

DESAFIOS DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL PARA UMA AGENDA DE ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA

As mudanças climáticas intensificam secas, enchentes e pressões sobre a qualidade e disponibilidade da água no Brasil, ampliando vulnerabilidades sociais e territoriais. Enfrentar esses desafios exige superar a dependência de soluções puramente infraestruturais e avançar para estratégias integradas que combinem governança, ciência, inovação e participação social. Este capítulo discute os principais desafios da gestão de recursos hídricos para uma agenda de adaptação e resiliência, organizados em cinco eixos: secas, chuvas intensas, águas subterrâneas, qualidade da água e gestão de riscos de desastres.

Gestão de riscos de desastres

A Gestão de Riscos de Desastres (GRD) é um processo sistemático que envolve a identificação, análise, avaliação, tratamento e monitoramento de riscos. A GRD tem como objetivo reduzir os impactos adversos de perigos e a probabilidade de ocorrência de desastres. É um esforço contínuo que visa proteger pessoas, bens e o meio ambiente. A GRD, de acordo com a UNDRR, abrange diversas etapas e medidas: (i) Prevenção (para evitar a ocorrência de desastres), (ii) Mitigação (para reduzir a intensidade dos impactos de um desastre), (iii) Preparação (para garantir que a comunidade esteja pronta para responder a um desastre), (iv) Resposta (ações tomadas durante e imediatamente após um desastre para salvar vidas e proteger bens) e (v) Recuperação (ações para restaurar um novo patamar de “normalidade” após ocorrência de desastres).

Adicionalmente, o Brasil é signatário do Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres, adotado em 2015, que visa orientar os esforços globais na prevenção e redução de riscos de desastres até 2030. Ele estabelece metas globais e prioridades de ação para fortalecer a resiliência das comunidades e reduzir os impactos negativos dos desastres. São prioridades: a) Compreender o risco de desastres, b) Fortalecer a governança do risco de desastres, c) investir na redução do risco de desastres para a resiliência, e d) Melhorar a preparação para desastres, incluindo resposta e recuperação.

As Metas do Marco de Sendai abrangem: i) a redução da mortalidade, ii) do número de pessoas afetadas, iii) de perdas econômicas, iv)

de danos à infraestrutura crítica, v) o aumento do número de países com estratégias de redução de riscos, vi) a cooperação internacional e vii) o acesso a sistemas de alerta precoce. Pelas Nações Unidas e Organização Meteorológica Mundial, a iniciativa “Alertas Precoces para Todos” (“Early Warnings 4 All”, da OMM, 2023) visa garantir que todos sejam protegidos por esses sistemas até 2027. Para redução de riscos é fundamental estabelecer escalas de atuação, por exemplo sistemas de alertas antecipados para eventos de curto prazo, e ferramentas financeiras para planejamento da mitigação no longo prazo.

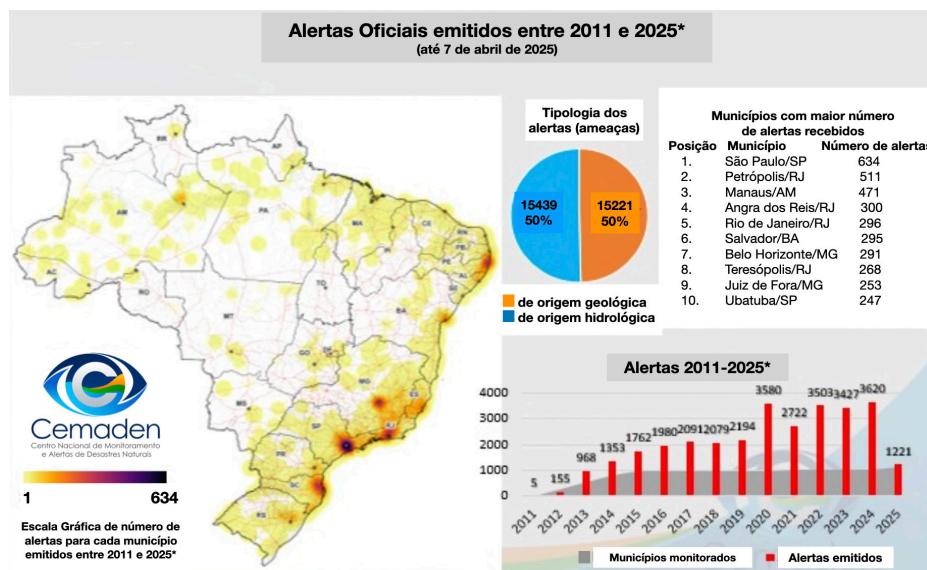
Neste contexto, para a consolidação do Sistema Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, foi criado o Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), com intuito de, em parceria com várias instituições, implementar, complementar e consolidar a rede de instrumentos meteorológicos, hidrológicos e geotécnicos para monitoramento e alerta de eventos extremos e seus impactos (deslizamentos, secas e inundações). O CEMADEN foi criado pelo Decreto Presidencial nº 7.513, é uma Unidade de Pesquisa (UP), vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e adota uma estrutura técnico-científica especializada.

Conforme o IPCC/AR6, o aquecimento global acima 1°C desencadeou aumento de frequência e da magnitude de extremos hidrológicos em níveis sem precedentes na história recente, especialmente de secas e cheias (Kreibich et al, 2022). Também, os impactos do clima sobre os recursos hídricos e setores usuários são mais vastos e severos do que se esperava, e os riscos futuros aumentam a cada fração de grau de aquecimento. Ao mesmo tempo, medidas de adaptação podem construir resiliência, mas é necessário aumentar o financiamento para expandir as soluções. Disto, o IPCC/AR6 alerta que, em trajetórias alinhadas ao limite de 1,5°C, o pico das emissões de GEE aconteceria antes ou próximo do ano 2025. Em consequência, o financiamento climático tanto para mitigação quanto para adaptação precisa de um aumento significativo nesta década. Assim, a gestão de riscos pode ser pautada por instrumentos como sistemas de alertas antecipados (ou precoces) e pelos seguros financeiros.

Sistemas de Alerta Antecipados

Um sistema de alerta antecipado é um conjunto de procedimentos e tecnologias projetados para detectar, monitorar e alertar sobre poten-

ciais perigos ou ameaças com antecedência, permitindo que pessoas e organizações tomem medidas preventivas para mitigar seus efeitos. Esses sistemas podem abranger desde alertas meteorológicos até avisos sobre desastres naturais, conflitos, surtos de doenças e outros eventos críticos. Para fins de recursos hídricos, são importantes alguns alertas relacionados a alertas meteorológicos, p.ex. Sistema “TerraBrasilis”/INPE (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/alerts>), INPE/Portal (<https://portal.inmet.gov.br/>), alertas de inundações, inundações, secas e outros eventos climáticos extremos do CEMADEN (<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/>). No Brasil, a Lei nº 12.608/2012 institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) que dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC). Além disso, autoriza a criação de um sistema de informações e monitoramento de desastres e altera outras leis relacionadas à defesa civil e planejamento urbano.



Entre 2011 e 2025, o CEMADEN emitiu alertas de origem hidrológicos e geológicos para mais de 1000 municípios prioritários no território brasileiro (Figura 2).

Figura 2: Mapa de Alertas (esquerda), características das ameaças dos alertas (centro), municípios mais alertados (direita superior), histórico de alertas emitidos e número de municípios monitorados entre 2011 e junho de 2025 (direita inferior) no Território Nacional Brasileiro. Fonte: Cortesia do Meteorologista e Coordenador Geral de Operação e Modelagem do CEMADEN - Marcelo Seluchi.

Em 2024, foram emitidos 3620 alertas relativos a 1690 desastres, dos quais 68% dos alertas foram de origem hidrológica e 32% de origem geológica (deslizamentos). Segundo o CEMADEN, a predominância de eventos hidrológicos reflete os impactos recorrentes das enchentes e enxurradas, notadamente em áreas urbanas mais vulneráveis. A emissão do alerta é sobre o potencial impacto que um evento intenso pode ocasionar, enquanto o impacto real depende das condições e vulnerabilidades de cada localidade. O CEMADEN monitora 1.133 municípios brasileiros, o que corresponde a 20% das cidades brasileiras e cerca de 60% da população do país.

No período 2014-2024, vinculados ao CEMADEN e ao INCT-Mudanças Climáticas Fase 2 (<http://inctmc2.cemaden.gov.br/>), a pesquisa brasileira avançou no desenvolvimento de modelos para previsão e emissão de alertas hidrológicos, especialmente sobre enchentes em áreas urbanas. Dando subsídios técnicos ao marco legal de defesa civil (Lei federal 12.608/2012), por um lado, esses avanços incluem aprendizado de máquinas e sistemas caóticos (Furquim et al, 2016), sistemas de informações geográficas com ciência cidadã (Horita et al, 2015; Fava et al, 2019) e uso de mídias sociais (Restrepo-Estrada et al, 2018). Por outro lado, novos modelos sociohidrológicos (Souza et al, 2021; Sarmiento-Buarque et al, 2021) alertam que a memória social e a percepção comunitária sobre as águas urbanas servem como sistemas de alertas de longo prazo dos riscos de impactos futuros sob cenários de mudanças climáticas. Uma revisão de tendências, desafios e perspectivas metodológicas sobre enchentes é proposta por Souza e Silva (2025).

Nas inundações excepcionais de Rio Grande do Sul, entre 28 de abril e 2 de maio de 2024, o CEMADEN emitiu 53 alertas hidrológicos de risco “alto” e/ou “muito alto”²². O Governo Federal, cria em 2024 a iniciativa “Defesa Civil Alerta”²³, no Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD). Os alertas avisam sobre a iminência de desastres naturais ou causados por pessoas, estabelecidos na Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade) e o que os moradores das

22 https://educacao.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2024/07/CEMADEN-_JMarengo_tragedia_RS.pdf

23 <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/defesa-civil-alerta-saiba-como-funciona-o-novo-sistema-de-alertas-de-desastres-do-governo-federal>

cidades devem fazer naquele momento. O conteúdo desses alertas é de responsabilidade dos órgãos estaduais de defesa civil.

Seguros Financeiros para Mitigação de Riscos

O risco ambiental e sua variável climática sempre foi um risco financeiro em sua essência, além de extremamente relevante, por exemplo, para riscos relacionados a fenômenos climáticos como secas e chuvas intensas. Do ponto de vista do risco climático, vale destacar um movimento importante que vem sendo estimulado em especial pela TCFD (Força Tarefa para Divulgações Financeiras de Informações Relacionadas com o Clima), que recomenda estudos de cenários e testes de stress relacionados a este risco e seus possíveis impactos nos resultados de companhias de diferentes setores, entre eles o de seguros. Assim, no cenário global, em 2020, seguradoras reunidas em torno do PSI (Princípios para Sustentabilidade em Seguros), da UNEP-FI²⁴, a Iniciativa Financeira do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

As crises de água, principalmente, aumentaram nas últimas décadas. No Brasil, secas e inundações representam mais de 80% dos desastres naturais e, segundo a ANA, entre 1995 e 2014 as perdas econômicas diretas somaram R\$ 9 bilhões por ano, acarretando prejuízos para famílias, indústrias e agricultores. Em todo o planeta, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial, fenômenos climáticos entre 1971 e 2012 foram responsáveis por quase 287 bilhões de dólares em prejuízos. O impacto econômico de desastres naturais provocados por essas mudanças climáticas é incontestável.

A última seca na região metropolitana de São Paulo, entre 2013 e 2015, aumentou os preços das contas de água e provocou racionamento para pelo menos 9 milhões de pessoas abastecidas pelo Sistema Cantareira. A seca somada a uma demanda de água contínua gerou déficit no abastecimento. Foi a pior crise hídrica e financeira da história da Companhia Estadual de Águas de São Paulo (SABESP). O lucro da empresa caiu 60% entre 2014 e 2015. Em relação às cheias, destacam-se as enchentes e inundações no Rio Grande do Sul em maio de 2024. Segundo a Confederação Nacional dos Municípios, esse desastre gerou prejuízos entre

24 <https://www.unepfi.org/insurance/insurance/>

12 e 100 bilhões de reais²⁵, sendo que o mercado segurador pagou em indenizações, para os sinistros do referido período, algo muito próximo dos R\$ 4 a 7 bilhões²⁶, segundo as fontes levantadas com base em dados preliminares.

Embora os seguros climáticos ainda sejam um desafio para a resiliência no Brasil, existem avanços tecnológicos dos chamados “seguro Indexado”. Nesta tipologia de seguro, os valores a serem pagos a famílias ou empresas em casos de falta d’água ou tragédias ambientais, por exemplo, podem variar conforme aumenta o risco de um desastre ocorrer bem como seu potencial de gerar prejuízos. Por meio de imagens de satélite, dados das chuvas, análise da vazão de rios e do fluxo da água é possível mapear uma área, simular cenários, estimar danos provocados por eventos climáticos e calcular preços e valores de indenizações justos em casos de secas ou enchentes. No período 2017-2025, fomentado pelo INCT-Mudanças Climáticas Fase 2, houve avanços sobre desenvolvimento de seguros indexados em recursos hídricos.

Por um lado, entre 2017 e 2020, ainda com cenários CMIP5/IPCC/AR5, os seguros climáticos foram baseados em modelos hidrológicos semi-conceituais e distribuídos (Mohor & Mendiondo, 2017; Guzmán et al, 2020; Taffarello et al, 2020;). Os modelos de seguros para setores usuários de água são sensíveis às magnitudes dos extremos hidrológicos, às forçantes radiativas dos cenários futuros e aos critérios de valoração de serviços ambientais de produção de água. Isto cobra relevância frente ao marco regulatório recente do saneamento (Lei Fed. 14.014/2020) e de pagamento de serviços ambientais (Lei. Fed. 14.119/2021)

Já no período 2021 e 2025, com novos cenários CMIP6/IPCC/AR6, os novos modelos de seguros no Brasil incorporaram uma análise exploratória de padrões de dados, a combinação de multi-ameaças climáticas e foram vinculados aos modelos de equilíbrio geral computável (Silva et al, 2021; Benso et al, 2023; 2025; Gesualdo et al, 2024).

Por outro lado, a Confederação Nacional das Empresas de Seguros Gerais, Previdência Privada e Vida, Saúde Suplementar e Capitalização, congrega as Federações. Assim, A CNSeg (2022), junto à UNEP FI incorpo-

25 <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/balanco-das-chuvas-no-rio-grande-sul-aponta-para-r-12-2-bilhoes-em-prejuizos-financeiros>

26 <https://cnseg.org.br/noticias/volume-de-indenizacoes-de-seguros-no-rio-grande-do-sul-chega-a-quase-r-4-bilhoes>

rou indicadores para transição climática e incorporou exposição geográfica brasileira a 11 riscos climáticos físicos, considerando dois cenários climáticos (aumento de 2°C e de 4°C) e dois horizontes temporais (2030 e 2050). Dentre estes riscos, 4 têm relação com recursos hídricos: 1) inundações urbanas; 2) inundações fluviais; 3) estresse hídrico, 4) secas. O marco normativo brasileiro, a Lei 15.040/2024, conhecida como “Marco Legal de Seguros”, dispõe sobre normas de seguro privado, e confere ao segurado o dever de declarar os riscos cotidianos em um questionário de avaliação de risco no momento da contratação. Este mecanismo torna a identificação dos riscos mais transparente e permite a precificação adequada, conforme o perfil de cada cliente. Completam o âmbito regulatório de seguros, a Circular SUSEP 666/22²⁷, fortalece a gestão de riscos climáticos, e a Resolução CNSP 473/24²⁸, e define regras de sustentabilidade para classificação de produtos de seguro.

Resiliência e adaptação a secas

Este item discute um conjunto de opções de ações de gestão e adaptação para o aumento da resiliência das comunidades que precisam lidar com a ocorrência de secas. A discussão apresentada aqui retrata, em boa parte, o que foi apresentado em Martins e Reis (2021), que fez parte do Relatório Especial sobre Secas, organizado pelo Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR, 2021).

Os extensos investimentos em infraestrutura hídrica no Brasil durante o período de 1990-2010, especialmente no Nordeste do Brasil, criaram uma falsa sensação de segurança em relação à segurança hídrica, independentemente da intensidade das secas. No entanto, a recente seca plurianual (2012-2018) demonstrou que enfrentar as secas requer não apenas a melhoria da infraestrutura, mas também a identificação de vulnerabilidades e o desenvolvimento de planos de contingência para cada setor e sistema de gestão da água, bem como a necessidade de uma governança mais coordenada, tanto em nível local quanto em níveis mais elevados.

A seca prolongada de 2012-2018 motivou discussões no Brasil sobre o aprimoramento da política e da gestão de secas (Martins et al.,

27 <https://www2.susep.gov.br/safe/scripts/bnweb/bnmapi.exe?router=upload/26128>

28 <https://www2.susep.gov.br/safe/scripts/bnweb/bnmapi.exe?router=upload/29371>

2016a). A necessidade de uma ação governamental mais coordenada em resposta às secas, envolvendo todos os níveis de administração (federal, estadual e municipal), tanto em medidas reativas de curto prazo quanto em medidas proativas de longo prazo, resultou no desenvolvimento de uma Política Nacional de Secas mais estruturada e proativa, que segue o ciclo de gestão de risco de desastres (Figura 3). Essa política é baseada em uma estrutura de três pilares (Figura 4), conforme descrito por Wilhite et al. (2005), e consiste nas seguintes categorias analíticas: (1) monitoramento e alerta/previsão antecipada, (2) avaliação de vulnerabilidade/resiliência e de impactos e (3) planejamento de mitigação e resposta (Gutiérrez et al., 2014).

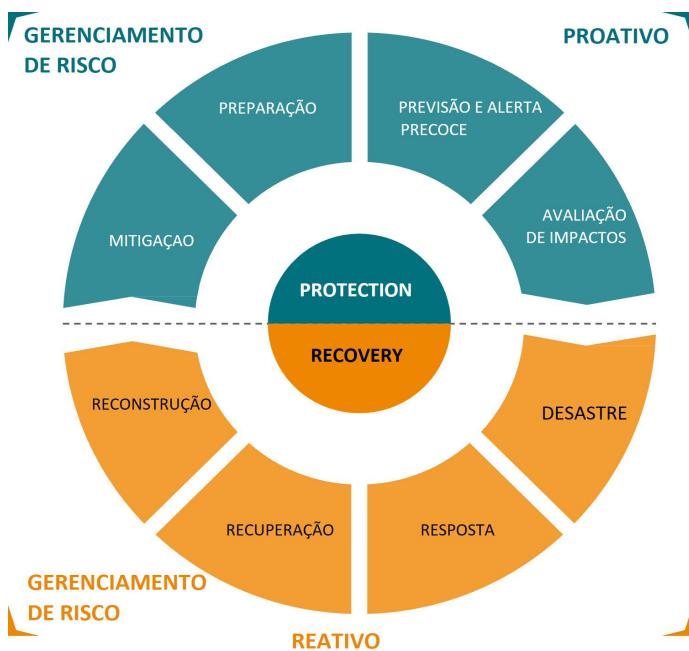


Figura 3: O ciclo de gestão de risco de desastres. A ênfase típica reativa e de gestão de crise das secas é indicada em vermelho na metade inferior da figura, enquanto a mudança de paradigma necessária em direção a uma gestão de risco mais proativa e preparação para secas é indicada na metade superior da figura, em azul. Fonte: Figura fornecida por Donald Wilhite, Universidade de Nebraska, Lincoln.

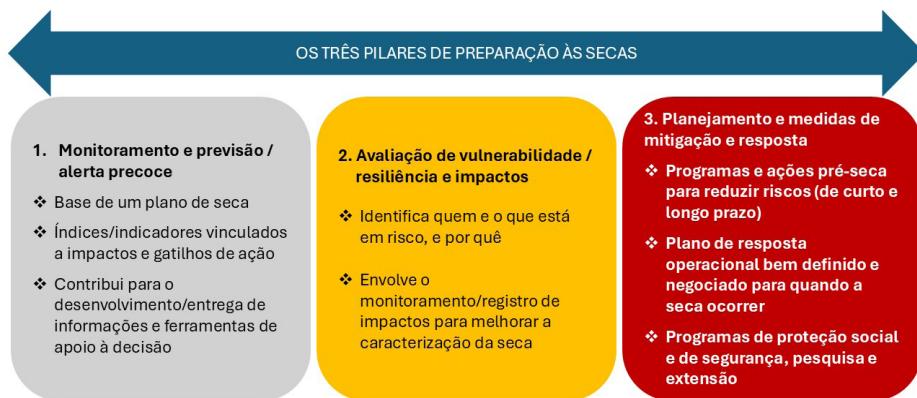


Figura 4: Os três pilares da preparação para secas que sustentam uma mudança de paradigma da gestão reativa de crises para abordagens mais proativas diante de eventos de seca. Fonte: Gutiérrez et al., 2014.

Previsão de secas do Nordeste Brasileiro – O Caso do Estado do Ceará e contribuição para consolidação de Políticas Públicas

Desenvolver sistemas de previsão confiáveis, capazes de prever a evolução futura de uma seca em andamento ou identificar o início, a gravidade e a extensão espacial de uma seca futura em uma região normalmente estável, pode ser um passo crucial para estabelecer um plano de gestão de risco de secas. Muitas iniciativas desse tipo já foram realizadas em nível global, incluindo na América do Norte, Europa, Austrália e Nordeste do Brasil (Steinemann, 2006; Shafiee-Jood et al., 2012; Wood et al., 2015; Cancelliere et al., 2006; Lavaysse et al., 2015; Prudhomme et al., 2015; Werner et al., 2015; Souza Filho et al., 2003; Sun et al., 2005; Canamaray et al., 2015; Pereira et al., 2015).

Os benefícios desses sistemas para a gestão de risco de secas são evidentes. Eles podem fornecer informações valiosas, embora incertas, sobre vários aspectos de uma seca, permitindo que gestores e tomadores de decisão tenham tempo suficiente para implementar medidas necessárias, reduzindo assim os impactos econômicos, sociais e ambientais das secas. No final da década de 1990, instituições meteorológicas no Brasil, incluindo o CPTEC/INPE e a FUNCEME, comprometeram-se a desenvolver um sistema de previsão climática para a região. Esta iniciativa inspirou o desenvolvimento de uma estratégia de monitoramento de secas que tem sido aplicada para todo o Brasil.

Nos finais dos anos 90, os benefícios potenciais do uso de previsões climáticas de precipitação para a gestão dos recursos hídricos já eram amplamente reconhecidos, e o Estado do Ceará investiu no desenvolvimento, pela FUNCEME, de modelagem climática numérica. Em 2001, a FUNCEME, o International Research Institute for Climate and Society (IRI) da Universidade de Columbia e o próprio IRI pioneiramente operacionalizaram um sistema para regionalizar previsões do modelo global ECHAM4.5 fornecidas pelo IRI. Ao longo dos anos, diversos sistemas de previsão climática numéricos e estatísticos foram desenvolvidos e apresentados nos fóruns de previsão, mas tiveram atenção limitada até janeiro de 2012, quando passaram a ser foco do fórum climático oficial.

Em janeiro de 2012, durante as discussões para a divulgação da previsão consensual para a quadra chuvosa de fevereiro a maio, Martins (2012) destacou a necessidade de mudanças imediatas no sistema de previsão climática, destacando a partir da análise das previsões consensuais entre 2001 e 2012, divulgadas em janeiro para a estação chuvosa, e verificou que, em 80% das vezes, o consenso indicava o tercil médio (“em torno da média”) como a categoria mais provável, o que estava distante das categorias realmente observadas.

Para resolver esse problema, Martins (2012) propôs um novo sistema baseado exclusivamente em previsões numéricas de modelos climáticos e no desempenho passado desses modelos. Entre os argumentos apresentados estavam: a complexidade do problema, a falta de compreensão de probabilidade e estatística, o envolvimento da equipe de previsão com o usuário final, agendas políticas do moderador da reunião, previsões consensuais restritas a áreas onde os modelos têm habilidade, uma abordagem conservadora para alcançar consenso nas negociações e a incompatibilidade entre o formato da previsão e o processo decisório. Observou-se também que esses fatores podem ocorrer em combinação.

Motivações de cunho político pessoal frequentemente dificultam o aprimoramento do sistema. Para superar isso, a FUNCEME implementou em 2012 um sistema de previsão baseado em modelos e tem buscado continuamente aumentar sua precisão e atrair atores nacionais para participar.

Reconhecendo a necessidade de mudança, conjuntamente CP-TEC/INPE, INMET e FUNCEME estabeleceram uma metodologia que combinou modelos das três instituições para alcançar probabilidades objetivas por tercis. Esse sistema tornou-se operacional em julho de

2012 e desde então passou a incluir o sistema independente de previsão climática da FUNCEME, que incorpora o Modelo Global de Previsão Climática ECHAM 4.6 e modelos regionais por ele forçados. Atualmente, as execuções da FUNCEME fazem parte da iniciativa de Conjunto Multimodelo Nacional, que inclui o modelo climático estatístico nacional do INMET, as três execuções de modelos globais do CPTEC/INPE e a execução ECHAM 4.6 da FUNCEME.

O impacto desse sistema de previsão para a antecipação de secas foi evidenciado em anos chuvosos, como 2008 e 2009, quando ele pôde orientar a operação de sistemas de reservatórios para garantir o abastecimento por vários anos. Em 2009, foi tomada a difícil decisão de priorizar o uso dos sistemas de monitoramento e previsão de clima e tempo em detrimento do plano de controle de cheias do maior reservatório do estado. Essa decisão resultou em armazenamento adicional de água e garantiu o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza durante a seca plurianual de 2012-2018. O uso de produtos de previsão climática nos processos de tomada de decisão nos setores de recursos hídricos e agrícola não é simples. Para maximizar o valor dessas previsões, é fundamental criar produtos orientados ao usuário que forneçam informações específicas para cada setor, no momento adequado.

Como exemplo, no Fórum de Previsão Climática de 2015, foram apresentadas evidências de que a seca em andamento no estado desde 2012 poderia persistir até 2016, com base em previsões de longo prazo da temperatura da superfície do mar. Apesar do alto nível de incerteza desse tipo de previsão, os tomadores de decisão do governo levaram muito a sério o impacto potencial de dois anos consecutivos de seca e decidiram agir de forma preventiva, lançando um grande processo licitatório para perfuração de poços, o que acabou ajudando a mitigar os impactos das secas subsequentes. A construção de 6.000 poços não teria sido possível sem o uso, pelo governo, das informações climáticas disponíveis. Embora este seja um exemplo bem-sucedido do uso de informações climáticas no processo decisório, é razoável supor que a comunicação eficaz entre cientistas e formuladores de políticas e decisões não teria sido possível se os impactos da seca já não fossem perceptíveis no momento da tomada de decisão.

Monitoramento de secas

O contexto do período 2012-2018 estimulou um diálogo já conhecido no país sobre o aprimoramento da política e da gestão de secas. O Ministério da Integração Nacional percebeu a necessidade de uma resposta estadual mais abrangente às secas, envolvendo todas as esferas administrativas — federal, estadual e municipal — e adotando uma perspectiva de longo prazo, em vez de apenas uma resposta emergencial. Essa percepção levou o ministério a formular uma Política Nacional de Secas mais estruturada (De Nys et al., 2016).

No passado, o debate sobre a gestão de secas ganhava ou perdia relevância conforme o ciclo de secas, o que resultava em avanços limitados rumo a uma gestão proativa. Inicialmente, para lidar com a complexidade do tema, o governo concentrou seus esforços no aspecto mais essencial da preparação para secas — o monitoramento — e também estabeleceu três Planos de Preparação para Secas para sistemas gerenciáveis, a fim de demonstrar a viabilidade do conceito (projetos-piloto para Abastecimento Urbano, Recursos Hídricos e Agricultura de Sequeiro).

Um modelo de monitoramento foi escolhido inspirado nos modelos do México e dos Estados Unidos, que reuniu informações de instituições federais e estaduais para produzir um único mapa mensal das condições de seca na região (Martins et al., 2016bc). Isso exigiu uma estreita colaboração entre instituições estaduais e federais, razão pela qual foi inicialmente lançado na Região Nordeste, restando atualmente apenas alguns estados fora do processo.

O processo foi um grande desafio para um país pouco acostumado a iniciativas tão coordenadas, e envolveu a integração de todos os bancos de dados regionais relevantes, permitindo o cálculo de diferentes indicadores de seca e a integração de diversas fontes de informação, incluindo sensoriamento remoto. O Monitor de Secas foi estabelecido em julho de 2014 e inicialmente liderado pela FUNCEME, com foco na região Nordeste, e apoio da Rede de Instituições de Clima/Água da região. Em fevereiro de 2017, foi assinado um Acordo de Cooperação entre a Universidade Federal do Ceará (UFC), a FUNCEME e com a liderança da ANA.

A Figura 5 ilustra os diversos atores estaduais envolvidos no processo, bem como as mudanças de liderança para garantir a participação formal das instituições federais. Uma década após essa mudança de paradigma (desde 2014), o país conta hoje com um robusto Monitor de Secas que inicialmente cobria apenas a região Nordeste (9 estados), mas que

cresceu ao longo do tempo até cobrir todos os 27 estados (todo o país), envolvendo mais de 60 instituições estaduais e 5 federais, demonstrando assim que a preparação para secas se tornou uma questão de interesse nacional. O objetivo do Monitor e de seu mapa resultante é aprimorar a compreensão e a definição de secas, bem como fortalecer a efetividade das respostas de políticas públicas para auxiliar as populações afetadas.

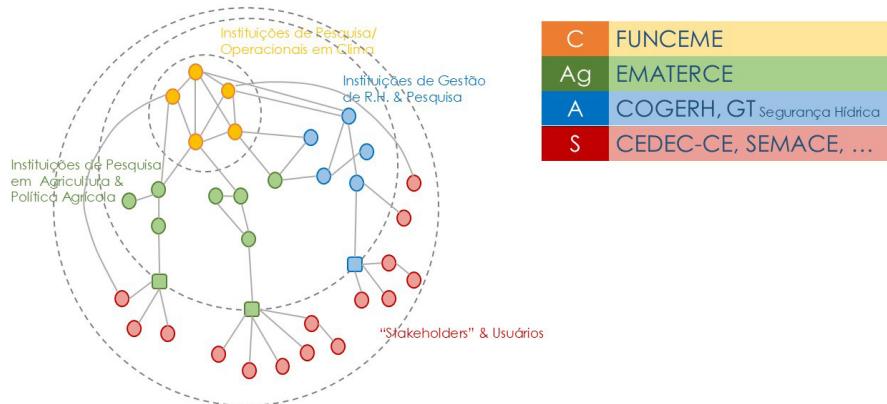


Figura 5: Processo do Monitor de Secas envolvendo, em nível estadual, instituições dos setores de Clima (C), Agricultura (Ag) e Água (A) e Usuários/Partes interessadas (S) (Defesa Civil, Órgão Ambiental e outros stakeholders). A figura também mostra o início e o status atual do Monitor de Secas, que teve inicialmente a FUNCEME como instituição central, de julho de 2014 a fevereiro de 2017, quando a ANA assumiu esse papel. Fonte: FUNCEME.

Planejamento

Os Planos de Contingência – O Monitor de Secas retrata principalmente a Seca Física ou Natural, enquanto a escassez hídrica, que está intimamente ligada a sistemas gerenciáveis, exige informações complementares. Para tratar dessa questão, foi implementado um programa piloto na região com o objetivo de estabelecer conexões entre o Monitor de Secas e o Plano de Preparação para Secas voltado a sistemas gerenciáveis. O objetivo principal do programa foi investigar as relações entre a seca física (representada pelo Monitor) e a seca operacional (indicada pelo Plano de Preparação) em três setores: Abastecimento Urbano, Recursos Hídricos e Agricultura de Sequeiro. O Monitor de Secas fornece informações cruciais, mas não suficientes para subsidiar plenamente os

Planos Setoriais de Preparação para Secas. As características e escalas específicas de cada setor desempenham papel significativo no desenvolvimento desses planos.

Os Planos de Preparação para Secas tiveram como objetivo demonstrar a aplicação prática da gestão proativa de secas por meio do uso de ferramentas e estratégias específicas. A correlação entre o Monitor de Secas e os Planos de Preparação varia, pois depende de como a seca física, representada pelo Monitor, se relaciona com a seca operacional representada nos Planos de Preparação. No caso do Plano de Preparação para Agricultura de Sequeiro, a seca operacional está fortemente vinculada à seca indicada pelo Monitor. Entretanto, essa relação pode não ser tão forte em outros planos.

O piloto no Nordeste lançou cinco planos de preparação como estudos de caso em três setores (De Nys et al., 2016, para detalhes específicos de cada plano): Serviços de Abastecimento de Água (Sistema Jucazinho – Estado de Pernambuco; Região Metropolitana de Fortaleza – Estado do Ceará), Planejamento de Bacias Hidrográficas (Bacia Piranhas-Açu – Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba), hidrossistema de usos múltiplos (Açude Jucazinho – Estado de Pernambuco) e Agricultura de Sequeiro de pequenos produtores (Município de Piquet Carneiro – Estado do Ceará). O objetivo desses planos foi tornar a preparação para secas mais acessível aos tomadores de decisão e promover a gestão proativa de secas.

Os planos foram concebidos para associar a categorização da seca a ações específicas de política e gestão, observando a estrutura dos três pilares. No entanto, a relação entre o Monitor de Secas e o Plano de Preparação pode variar conforme o setor, já que alguns podem requerer a adaptação do sistema de monitoramento devido à sua escala e características específicas. Após os esforços piloto dos Planos de Preparação para Secas, iniciaram outros estudos de caso na Região Nordeste, incluindo abastecimento urbano e hidrossistemas e agricultura de sequeiro de pequenos produtores.

Vários estados têm dedicado recursos significativos para avançar nos outros dois pilares, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de planos de contingência para secas adaptados a diversos setores. As lições da experiência brasileira estão sendo compartilhadas e adaptadas em outros países por meio de intercâmbio Sul-Sul, como com Essuatíni e Jordânia. No entanto, tais iniciativas demandam tempo, dada sua natureza setorial e a necessidade de personalização para sistemas

individuais (por exemplo, hidrossistemas, cidades etc.) sob sua responsabilidade. Além disso, reconhecendo que a adaptação ocorre principalmente no nível local, novas iniciativas têm sido implementadas em nível comunitário de forma participativa. Essas iniciativas consideram a capacidade de inovação de cada comunidade em termos de governança da água, garantindo seu engajamento ativo nas fases de diagnóstico, planejamento prospectivo e implementação.

Em períodos de seca, a maximização do uso da água não se limita à eficiência econômica, mas também envolve a integração de políticas públicas que promovam o nexo água-alimentos-energia-meio ambiente. No semiárido brasileiro, por exemplo, a convivência com a seca, combina tecnologias de captação e armazenamento de água (cisternas, barragens subterrâneas) com práticas agrícolas sustentáveis, como o cultivo de culturas resistentes à seca. Essas estratégias são incentivadas por dinâmicas de mercado, como o aumento dos preços de commodities agrícolas em períodos de escassez, mas também requerem planejamento para evitar a superexploração de recursos hídricos, que pode comprometer a resiliência a longo prazo.

Resiliência e adaptação a eventos de chuvas intensas

Os aspectos conceituais relativos às questões de adaptação em Águas Urbanas devem garantir “Sustentabilidade e Resiliência – particularmente no contexto de eventos extremos”, em acordo com a Carta de Recife 2024, do XV Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU) e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos (SRRU), da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro). Para contextualizar, além dos inúmeros prejuízos materiais, houve uma grande quantidade de vítimas fatais dos últimos anos (mais de 600 óbitos causados pelas chuvas, considerando-se os casos de Petrópolis, Região metropolitana de Recife, São Sebastião e cidades do Rio Grande do Sul).

Tais eventos extremos e seus impactos tornam claras a extensão dos desafios e a premência de debater alternativas e meios técnicos, políticos e financeiros para implementá-las, observando-se princípios de sustentabilidade e participação social. Dessa forma, a partir de uma reflexão sobre os eventos que têm ocorrido e os desafios climáticos que temos pela frente, destacam-se ações como:

- Reconhecer que as cidades brasileiras estão cada vez mais vulneráveis aos problemas causados por chuvas de grande intensidade, de forma que gestores e a sociedade como um todo enfrente o problema de forma abrangente e multidisciplinar.
- Fomentar a compreensão, pelos moradores das cidades, dos riscos presentes na ocupação de áreas de encostas e margens de rios e córregos e de como tais riscos podem agravar-se em face de mudanças climáticas. Assim, gestores podem desenvolver programas de educação hidroambiental para que a sociedade se conscientize da existência do risco e possa se preparar adequadamente aos eventos.
- Assegurar que as infraestruturas e instalações operacionais de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas sejam dimensionadas e implantadas com as melhores técnicas e tenham manutenção preventiva e corretiva constantes, assim como a reposição e atualização dos sistemas de alerta e seus componentes.
- Desenvolver uma cultura de prevenção para manter a memória viva e evitar o esquecimento, mesmo que o intervalo entre ocorrências de eventos extremos seja grande. Uma ação efetiva pode ser a inclusão da cultura de prevenção de riscos de desastres no currículo da educação formal, em seus diferentes níveis.
- Incentivar o conhecimento científico avançado incluindo a modelagem computacional, sensoriamento remoto, internet das coisas, inteligência artificial, enquanto ferramentas que precisam ser utilizadas para definição de programas e projetos e, sempre que possível, considerando as mudanças climáticas.
- Ampliar e modernizar a rede de monitoramento qualitativa e quantitativa da área urbana para formar uma robusta base de dados, essencial para fornecer subsídios visando a calibração e validação de modelos, bem como para auxiliar na tomada de decisão nos projetos de revitalização de cursos d'água e de mitigação de inundações.
- Reconhecer que as universidades, entre outros institutos de ensino e pesquisa, possuem expertise para a proposição de soluções adequadas à realidade dos centros urbanos onde atuam e, portanto, devem ser consideradas pelas prefeituras para o desenvolvimento de políticas públicas integradas aos projetos de micro e macrodrenagem urbana.

- Priorizar, dentre as ações governamentais, as populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica, que estão mais suscetíveis aos riscos hidrológicos, utilizando tecnologias sociais que contribuam para a redução do risco.
- Priorizar ainda, dentre as ações governamentais, políticas públicas que considerem os efeitos dos eventos extremos e das mudanças climáticas, com utilização dos conhecimentos mais avançados e inovadores, na busca de maior sustentabilidade e resiliência dos ambientes urbanos.

Águas subterrâneas

As alterações nos padrões de ocorrência das águas subterrâneas no Brasil em decorrência das mudanças climáticas têm potenciais consequências principalmente para o abastecimento humano, agricultura e ecossistemas, mas também para indústria e outros setores usuários, dependendo da região. Para enfrentar os desafios atuais e futuros, deve-se buscar a gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas, aspecto também reforçado por pesquisa recente de Hirata et al. (2025), além de investir em monitoramento hidrogeológico (Uchôa et al., 2024), ainda muito incipiente no país e com grandes assimetrias regionais. Ferramentas auxiliares, baseadas em sensoriamento remoto também precisam ser mais disseminadas. ANA (2024), no último relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, ressalta a necessidade de estudos para avaliação da interdependência entre os fluxos superficiais e subterrâneos e sua importância para a gestão integrada. O relatório Conjuntura destaca a importância de identificar as porções das bacias onde os rios têm maior dependência dos aquíferos para a manutenção de suas vazões, tornando essas regiões prioritárias para implementação da gestão integrada rio/aquífero.

Recarga artificial de aquíferos, ou RGA (Recarga Gerenciada de Aquíferos), se destaca como uma estratégia de adaptação para as águas subterrâneas. Ainda não regulamentada no Brasil, mas com diversas pesquisas que podem orientar a formulação de política pública nesse sentido, a RGA pode considerar diversas fontes de água para essa finalidade, como águas de reuso de esgoto tratado, captação de águas de chuva em edificações no meio urbano, dentre outras. Recentemente, OODARZI et al. (2024) conduziram pesquisas para avaliar o potencial de RGA no esta-

do de São Paulo como estratégia de enfrentamento de efeitos de mudanças climáticas nos recursos hídricos.

Como a gestão de águas subterrâneas no Brasil é de responsabilidade dos estados, mais uma vez se reforça a necessidade de fortalecimento dos órgãos gestores estaduais.

Qualidade da água

Considerando que sistemas hídricos estão suscetíveis aos eventos extremos (secas e cheias) e considerando a complexidade dos processos hidrodinâmicos, morfodinâmicos e biogeoquímicos que caracterizam esses ambientes, os efeitos de uma variedade de eventos extremos induzidos pelas mudanças climáticas (frequência e aumento de intensidade) de fato indicam um risco potencial para a deterioração da qualidade da água.

Neste contexto destaca-se a relevância do monitoramento sistemático de parâmetros de qualidade da água, como parte do processo de gestão quali-quantitativa, mas que permita avaliar o impacto físico, químico e biológico no âmbito da dinâmica integrada dos ecossistemas. Tem-se muito que aprender sobre o impacto das mudanças climáticas na gestão de qualidade da água. Isso requer a adoção de abordagens multirriscos que integrem múltiplos estressores na avaliação dos impactos das mudanças climáticas na qualidade da água em sistemas ambientais.

Ferramentas inovadoras de modelagem e monitoramento são cruciais para abordar interações complexas e dinâmicas entre estressores relacionados às mudanças climáticas, processos ecossistêmicos, constituintes da qualidade da água e características morfológicas específicas do local (Kozak, 2021). Avanços no monitoramento de longo prazo e alta resolução, juntamente com o desenvolvimento de modelos sofisticados de IA baseados em processos e dados, bem como estratégias híbridas, devem ser o foco central de pesquisas futuras, para abordar lacunas de conhecimento, aprimorar as capacidades preditivas e reduzir incertezas.

Adicionalmente, considerar fatores impulsionados pelo homem, como o uso da terra e medidas de adaptação, é vital para desvendar a dinâmica complexa do sistema sob múltiplas pressões. Além disso, o trabalho futuro poderia ser aprimorado por iniciativas mais acessíveis (de baixo custo e fáceis de usar) que envolvam os cidadãos no contexto da socio-hidrologia (Almeida, 2024) nos esforços de coleta de dados, como

a divulgação de indicadores visuais de má qualidade da água para alertar as autoridades locais.

Essa abordagem integrada fomentaria pesquisas mais participativas, colaborativas e orientadas pela comunidade, aprimorando a compreensão científica e social da dinâmica de sistemas complexos sob múltiplas pressões.

ASPECTOS DAS POLÍTICAS PÚBLICAS E INOVAÇÕES NA AGENDA DE ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA

As políticas públicas de recursos hídricos no Brasil enfrentam o desafio de responder a um cenário de intensificação das mudanças climáticas, que ampliam riscos de escassez, cheias e conflitos pelo uso da água. Neste item, apontam-se caminhos para modernizar instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e explorar inovações sociotécnicas, regulatórias e institucionais que fortaleçam a resiliência e a adaptação do país. O objetivo é destacar avanços e propor estratégias capazes de alinhar ciência, gestão e sociedade na construção de uma agenda hídrica mais preventiva, integrada e orientada ao futuro.

Instrumentos para a Gestão de Recursos Hídricos – visão ampliada

Diante da intensificação dos impactos da mudança do clima sobre os regimes hidrológicos e os usos múltiplos da água, torna-se imprescindível reavaliar e aprimorar os instrumentos da PNRH, instituída pela Lei nº 9.433/1997. Embora esses instrumentos tenham proporcionado avanços importantes na gestão descentralizada e participativa da água no Brasil, muitos deles ainda não incorporam plenamente a dimensão da adaptação climática nem oferecem respostas adequadas aos novos riscos associados à variabilidade e incertezas hidrológicas. A seguir, são apresentadas propostas de aprimoramento para cada um dos instrumentos da PNRH, organizadas por tópicos, com foco na promoção de uma gestão mais adaptativa, preventiva, territorializada e baseada em evidências científicas. Esses aprimoramentos visam modernizar o marco regulatório, integrar a lente climática nos processos decisórios e fortalecer a resiliência hídrica nacional frente às pressões do século XXI.

vi. Plano de Recursos Hídricos

- Incorporar sistematicamente os cenários climáticos e a avaliação da vulnerabilidade hídrica como conteúdo obrigatório dos planos, abrangendo tanto os riscos de escassez quanto de cheias.
- Utilizar ferramentas como o Water Tracker para avaliar a integração da adaptação nos planos e monitorar a efetividade das ações propostas.
- Territorializar a análise de risco, transpondo a escala das bacias para o nível municipal, de modo a orientar respostas locais frente às mudanças climáticas.
- Certificar e qualificar o potencial de adaptação das ações existentes nos planos, com base em critérios técnicos robustos e evidências científicas.
- Criar um selo ou sistema de classificação que indique o grau de contribuição de cada ação à adaptação hídrica, facilitando a priorização e a alocação de recursos por parte dos gestores.
- Estimular a revisão periódica dos planos com base em novos cenários climáticos, promovendo um ciclo contínuo de atualização e aprendizado adaptativo.

vii. Cobrança pelo uso da água
Introduzir mecanismos tarifários dinâmicos, inspirados nas bandeiras tarifárias do setor elétrico, para refletir a escassez hídrica.

- Vincular o valor da cobrança ao estado hidrológico em tempo quase real, via decretos de escassez e monitoramento hidrometeorológico.
- Usar a cobrança como sinal econômico para incentivar o uso racional da água em cenários de estresse climático.

viii. Outorga de direito de uso da água

- Evoluir para um modelo adaptativo, com revisões condicionadas a gatilhos hidrológicos.
- Incorporar indicadores de disponibilidade hídrica e restrições temporárias em eventos críticos.
- Utilizar séries históricas mais recentes para estimar oferta hídrica em consonância com o novo regime climático.

- Considerar explicitamente as incertezas nas análises de balanço hídrico, reforçando a gestão por risco.

ix. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)

- Consolidar o SNIRH como base técnico-científica para a gestão adaptativa.
- Harmonizar cenários climáticos e apoiar a produção científica com dados hidrológicos de alta qualidade.
- Oferecer capacitação contínua e metodologias para avaliação de risco e vulnerabilidade.
- Modernizar a rede hidrometeorológica com base em critérios de risco e investir em governança de dados e integração institucional.

x. Enquadramento dos corpos hídricos

- Incorporar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica, especialmente nas vazões de diluição.
- Articular qualidade e quantidade da água sob uma ótica de risco, sobretudo para orientar investimentos em saneamento e infraestrutura resiliente.
- Ajustar o enquadramento às novas realidades climáticas, em especial nas regiões mais vulneráveis.
- Promover avaliação de planos de efetivação de enquadramento.
- Estabelecer metas e ações com abordagens baseada em estratégias de ciência cidadã (*citizen science*, Ramirez et al, 2023) e Socio-hidrologia.
- Integração de abordagem ecossistêmica em processos de enquadramento

Estratégias Complementares e inovações sociotécnicas

i. Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

As SbN vêm se consolidando como estratégia essencial de adaptação do setor de recursos hídricos às mudanças climáticas. Ao invés de depender exclusivamente de grandes obras de infraestrutura, favorecem a conservação de ecossistemas, ampliam a infiltração de água no solo e

contribuem para a regulação dos fluxos hídricos. Além de reforçar a resiliência frente à variabilidade climática, geram ganhos adicionais em biodiversidade, qualidade da água e provisão de serviços ecossistêmicos.

Entre as medidas mais relevantes estão soluções descentralizadas e de pequena escala, como o mapeamento e uso estratégico de pequenos reservatórios, capazes de assegurar disponibilidade em períodos secos e reduzir impactos de eventos extremos. Integradas a práticas de restauração florestal, recuperação de áreas úmidas e manejo sustentável do uso da terra, essas iniciativas demonstram o potencial das SbN para combinar infraestrutura natural e cinza em respostas mais flexíveis e adaptativas.

Nesse cenário, os Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) ganham destaque como mecanismos de incentivo para viabilizar SbN. Ao remunerar agricultores e comunidades pela conservação de ecossistemas estratégicos, os PSA fortalecem a proteção dos serviços hídricos e ampliam a escala de aplicação das soluções. A integração de SbN e PSA em políticas públicas representa, portanto, uma oportunidade para alinhar benefícios ambientais e sociais, reforçar a governança e assegurar maior segurança hídrica diante das mudanças climáticas.

ii. Revitalização de Bacias Hidrográficas

Ainda sem abrangência em larga escala, vários esforços vêm sendo empreendidos para a revitalização de bacias hidrográficas, que pode também ser considerada uma estratégia de gestão adaptativa e de resiliência climática. O Programa Produtor de Águas da ANA foi criado para incentivar o produtor rural a investir em ações que ajudem a preservar a água. O Programa Produtor de Água utiliza o conceito de PSA, incentivando produtores rurais a adotarem práticas conservacionistas em suas propriedades, como o controle da erosão e o manejo adequado da vegetação. Em troca, recebem apoio técnico e financeiro para implementar essas práticas.

Desde sua criação, o programa tem se mostrado eficaz na revitalização de bacias hidrográficas e na melhoria da qualidade e oferta de água. A ANA apoia 76 projetos em todo o país, abrangendo regiões metropolitanas de grandes cidades como Brasília, Campo Grande, Florianópolis, Goiânia, Palmas, Rio Branco, Rio de Janeiro e São Paulo.

Além da ANA, o programa conta com a participação de outras instituições federais, estaduais, municipais e da sociedade civil. A iniciativa faz parte do Planejamento Estratégico da ANA e está alinhada com o Plano

Nacional de Recursos Hídricos, segundo a ANA. O Programa Produtor de Águas completou 10 anos em 2024 e recuperou mais de 47 mil hectares.

Em 2022, o então MDR (Ministério do Desenvolvimento Regional) coordenou e contratou a elaboração do Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas cujo documento final apresenta diretrizes, objetivos, modelos de gestão e arranjos institucionais. O documento destaca, como marco importante para reorientar a estratégia de revitalização de bacias hidrográficas no Brasil, o reconhecimento da importância das SbN na agenda da água mundial. De acordo com Unesco (2018), especialmente no que se refere à melhoria da segurança hídrica, a ampliação das SbN será fundamental para a realização da Agenda 2030.

iii. Serviços Públicos de Drenagem e Manejos de Águas Pluviais Urbanas

As questões de drenagem urbana têm um papel relevante nas estratégias de adaptação. Particularmente com o objetivo de minimizar os impactos da urbanização, reduzir a poluição hídrica, promover a segurança hídrica e a gestão integrada das águas pluviais.

Como contribuição recente, destaca-se a norma de referência para Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) – NR nº 12/2025 – emitida pela ANA. Essa norma estabelece diretrizes e critérios para a estruturação, regulação e prestação dos serviços de DMAPU, buscando minimizar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico e a poluição dos corpos d'água. Com destaque, a demanda estratégica de integração dos sistemas de DMAPU com a escala territorial e socioambiental da bacia hidrográfica.

iv. Marcos regulatórios, alocação de água e gestão adaptativa

Uma experiência inovadora e relevante de gestão em bacias hidrográficas compartilhadas (com duplo domínio das águas, federal e estadual) são os denominados marcos regulatórios, entendidos como acordos formais estabelecidos entre a ANA e os órgãos estaduais responsáveis, com a participação dos usuários. Esses instrumentos funcionam como pactos que definem responsabilidades e regras comuns para enfrentar períodos de crise hídrica ou resolver disputas já existentes.

Uma vez instituído, o marco regulatório passa a servir de referência para a regulação dos usos da água, orientando as decisões de gestão na

bacia ou sistema hídrico correspondente. No contexto de intensificação da variabilidade e mudanças do clima, é essencial adotar marcos legais mais flexíveis, com previsão de revisões periódicas de alocação e de cláusulas de reavaliação contratual durante eventos extremos.

Outra iniciativa inovadora no contexto da gestão integrada de recursos hídricos no Brasil é a alocação negociada de água, desenvolvida no estado do Ceará e depois ampliada para outras regiões com estresse hídrico no país. Nos Relatórios de Conjuntura ANA, a alocação negociada de água é apresentada como um instrumento de gestão que busca compatibilizar usos múltiplos em situações de conflito, especialmente em bacias e sistemas hídricos com restrição de disponibilidade. Trata-se de um processo participativo, que envolve usuários, órgãos gestores e comitês de bacia, resultando em acordos que definem regras temporárias de uso da água.

A ANA enfatiza que esse mecanismo tem se mostrado eficaz na prevenção de litígios e na redução de impactos econômicos e sociais durante períodos de escassez, pois promove diálogo, transparência e responsabilidade entre os atores envolvidos. Além da experiência consolidada do Ceará, experiências em nível nacional como a da Bacia do rio São Marcos, são frequentemente destacadas como exemplos de arranjos institucionais que garantiram maior segurança hídrica em contextos críticos. Com a intensificação de eventos de seca em todo o país, é essencial ampliar e fortalecer instrumentos de alocação negociada e adaptativa, com base em risco climático.

Mais recentemente, e de forma inovadora, instrumentos como a Outorga com gestão de Garantia e Prioridade (OGP) e a Outorga com Gestão Compartilhada (OGC) são duas abordagens que estão sendo testadas em ambiente regulatório experimental pela ANA. A OGP consiste em emitir outorgas com garantia mais baixa do que usualmente adotado pela ANA, sem se limitar a uma vazão de referência fixa. Já a OGC prevê a realocação, ou compartilhamento, de volumes de água que estão outorgados formalmente, mas que estão momentaneamente sem ser usados.

Ambas as iniciativas visam à maximização do uso da água e ao atendimento de usuários que não poderiam ser outorgados dentro das abordagens convencionais. Além disso, são iniciativas que foram construídas com a participação dos usuários e que descentralizam a tomada de decisão sobre como a água deve ser usada no dia a dia, representando

uma inovação do ponto de vista de gestão descentralizada, participativa e socio-hidrológica no contexto de adaptação.

v. Instrumentos econômicos e financeiros

A adaptação do setor de recursos hídricos às mudanças climáticas exige o fortalecimento de instrumentos econômicos e financeiros capazes de reduzir vulnerabilidades e ampliar a resiliência. Seguros climáticos e hidrológicos podem oferecer proteção a setores estratégicos, como a agropecuária e o abastecimento urbano, mitigando perdas em eventos extremos.

Outro caminho é a precificação da água com base em critérios de risco e escassez, ajustados às condições sociais e territoriais, de modo a promover o uso mais eficiente e equitativo dos recursos hídricos. Essa abordagem pode estimular práticas sustentáveis, ao mesmo tempo em que garante acesso justo às populações mais vulneráveis.

Ainda, a criação de fundos de resiliência e de mecanismos de pagamento por serviços hidrológicos representa uma oportunidade de integrar diferentes esferas de governo e comunidades locais. Esses instrumentos contribuem para financiar soluções adaptativas, apoiar a conservação de ecossistemas estratégicos e consolidar a segurança hídrica frente à variabilidade e às incertezas climáticas.

Desafios da Governança e da construção da resiliência

A governança da água é um tema complexo e multifacetado que envolve a participação de diversos atores e a articulação entre diferentes níveis e setores para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos. Em um contexto de mudanças climáticas, a gestão resiliente da água torna-se crucial, especialmente em territórios com condições semiáridas e alta variabilidade hídrica.

Desafios de inovação e governança

Conforme apontado por Martins (2025), a inovação na gestão da água é limitada por complexidades de governança em níveis nacional, regional e local. Essas restrições frequentemente impedem o desenvolvimento de abordagens de modelagem específicas para comunidades,

adaptadas às necessidades e contextos locais, especialmente em territórios vivos onde a habitabilidade e a resiliência devem ser equilibrados em contextos altamente variáveis, como regiões semiáridas que praticam a convivência com a seca. Essa abordagem, enraizada no princípio da subsidiariedade, enfatiza o empoderamento local dentro de um contexto global mais amplo para garantir que as soluções sejam contextualmente relevantes.

Além disso, a multiplicidade de iniciativas em diferentes escalas nos territórios hídricos pode levar a uma “redundância” voluntária de soluções. Embora isso possa parecer contrário à eficiência e ao desempenho — frequentemente associados a soluções lineares —, é necessário para lidar com os impactos da variabilidade e mudanças do clima e uso do solo sobre os “territórios da água”.

A dependência excessiva de soluções baseadas em infraestrutura (*hard engineering*) também representa um problema. Embora necessárias, essas soluções podem criar vulnerabilidades a longo prazo, especialmente quando não são adaptadas a mudanças climáticas ou à degradação de sistemas antigos. Isso destaca a diferença entre uma gestão que prioriza apenas o desempenho técnico (*performing water*) e outra que valoriza a adaptação social e ambiental (*resilient water*).

A fragmentação entre políticas de diferentes setores — como agricultura, planejamento urbano e gestão hídrica — leva a alocações de recursos mal alinhadas, comprometendo estratégias integradas. Modelos de financiamento padronizados ignoram as diversidades territoriais, limitando a implementação de soluções eficazes em contextos urbanos e rurais distintos.

Desafios Sistêmicos e Operacionais

As abordagens tradicionais de planejamento partem da premissa de que clima e uso da terra são estáveis, o que já não reflete a realidade. Essa visão ultrapassada compromete a eficácia das estratégias de longo prazo, sobretudo em regiões onde a variabilidade climática é alta. Embora dados climáticos estejam disponíveis, sua utilização em políticas públicas e na tomada de decisão ainda é limitada (ver Martins, 2025).

A falta de estratégias locais para lidar com anos extremamente secos ou chuvosos provoca falhas logísticas, uso excessivo de recursos e aumento da vulnerabilidade das comunidades. A comunicação pública

durante crises climáticas — como enchentes ou secas — também é insuficiente, reduzindo a capacidade de resposta da população.

A rotatividade de lideranças e a má gestão de recursos impedem a continuidade de políticas e ações de adaptação. Isso evidencia a necessidade de maior transparência, planejamento de longo prazo e participação ativa de múltiplos atores — incluindo governos,

Outro aspecto crítico refere-se ao financiamento para construir resiliência. Além da dificuldade de acessar financiamento em meio à competição com outras demandas de investimentos ao nível de cada unidade administrativa, um dos principais entraves é o desalinhamento territorial dos instrumentos de financiamento usados para desenvolver soluções adaptadas ao nível de território. Esses instrumentos, frequentemente caracterizados por uma estrutura rígida de investimentos predefinidos, restringem ou dificultam o envolvimento de atores locais, em suas diversas escalas, na concepção, implementação e operação das soluções.

No campo da capacitação e comunicação, recomenda-se definir estratégias eficazes para a educação/capacitação e comunicação sobre mudanças climáticas e água no contexto da gestão adaptativa que incluam o foco tanto nos problemas quanto nas soluções, a conexão de questões globais com as locais, a incorporação de atividades práticas e recursos digitais, o entendimento do conceito de risco e a promoção de um senso de justiça ambiental no processo de gestão adaptativa. De forma estratégica, recomenda-se integrar a educação sobre mudanças climáticas, água e adaptação nos currículos, para proporcionar desenvolvimento não somente profissional, técnico e científico, mas tornar a sociedade “agentes da mudança”. Nesse sentido, as prioridades incluem:

1. Dar foco em Soluções e Problemas;
2. Conectar Questões Globais às realidades locais;
3. Integrar Mudanças Climáticas e Segurança hídrica em projetos de extensão;
4. Incentivar Atividades Práticas e Recursos Digitais;
5. Estimular Reflexões sobre Justiça Ambiental e Impacto Social;
6. Apoiar o Desenvolvimento e Apoio Profissional no contexto de ciência cidadã;
7. Capacitar Alunos como Agentes de Mudança;
8. Repensar a Infraestrutura Escolar à luz das novas demandas climáticas e ambientais.

Desafios de monitoramento e Sistema de Informações

A perspectiva de construir estratégias para adaptação tem fundamento em entendimento de processos hidrológicos. A ciência hidrológica,

apesar dos avanços na utilização de modelos não só como ferramentas para planejamento, mas conhecimento da natureza física de processos hidrológicos, só se sustenta em função da relevância do monitoramento e a fundação dos sistemas informações e sua disponibilização em formato aberto, como os exemplos já consolidados como o Sistema Nacional de Informações sobre recursos Hídricos (SNIRH).

Neste contexto o futuro de planejamento vai requerer mais informações integradas e de natureza multidisciplinar, para com base em cenários futuros e avaliação de incertezas para permitir: (i) avaliar a magnitude e a natureza das mudanças climáticas e seus impactos sobre bacias hidrográficas considerando aspectos de downscaling e dinâmicas espaciais e temporais (ii) estabelecer a capacidade dos ecossistemas de se adaptarem naturalmente ou por meio de intervenção gerenciada às mudanças climáticas e das dinâmicas hidrológicas; (iii) considerar o aumento futuro da população e das atividades econômicas, com impactos potenciais sobre os recursos naturais; (iv) permitir estabelecer critérios para dimensionamento de infraestrutura hídrica e (v) a adaptação da sociedade humana por meio das respostas lógicas de indivíduos, empresas, mudanças políticas e segurança, no contexto da ciência cidadã e da socio-hidrologia.

A adaptação às mudanças climáticas precisa ser dinâmica, e é necessário considerar questões institucionais, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos em processos integrados orientados ao desenvolvimento. Mas a garantia de efetividade está no reconhecimento tácito que manter sistemas de informações hidrometeorológicas e garantia de efetividade de planejamento e execução consistente de medidas resilientes para a adaptação às alterações climáticas.

Integração de ações

Políticas e programas são frequentemente concebidos, implementados e operados de forma isolada, sem coordenação ou sinergia, desconsiderando seus impactos mútuos. Modelar soluções com base no nexus água-alimentos-energia-meio ambiente é fundamental para desenvolver abordagens integradas que combinem dados setoriais, promovam a colaboração entre políticas públicas e programas e evitem o desperdício de esforços. Promover essa integração exige:

- Coordenação multinível: articular níveis nacional, estadual, municipal e de bacias hidrográficas, com papéis bem definidos e canais de decisão e financiamento coerentes.
- Portfólios combinados: integrar infraestrutura cinza com soluções baseadas na natureza, gestão da demanda, instrumentos econômicos e governança adaptativa.
- Redundância inteligente e flexibilidade: prever alternativas operacionais para choques, incluindo gatilhos que ampliem a resposta em anos de seca ou cheias extremas.
- Financiamento e regulação calibrados ao território: substituir modelos padronizados por arranjos adequados a cada contexto, que incentivem monitoramento, transparência e prestação de contas.
- Capacitação e circulação de informação: transformar dados climáticos em insumos efetivos para decisões, fortalecendo serviços de extensão técnica e a comunicação de riscos com gestores e comunidades.

Em síntese, avançar da água “performativa” para a água “resiliente” requer reduzir a fragmentação institucional, planejar para a variabilidade e acoplar políticas pelo nexo. Isso alinha o capítulo à segurança hídrica como objetivo público: garantir funções ecossistêmicas, qualidade de vida e continuidade dos serviços, hoje e no futuro.

MUDANÇA CLIMÁTICA E DESAFIOS DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – VISÃO DA ANA

A intensificação dos eventos climáticos extremos e as alterações progressivas no regime hidrológico brasileiro têm pressionado os sistemas de gestão de recursos hídricos a operar além de sua capacidade institucional, normativa e financeira. A crise climática não apenas exacerba os riscos hidrológicos existentes, como também evidencia as limitações estruturais do modelo atual de governança da água, ainda fortemente baseado em pressupostos de previsibilidade, estabilidade e compartimentalização setorial. Nesse contexto, torna-se urgente compreender os principais desafios que dificultam a adaptação do setor de recursos hídricos às novas condições impostas pela variabilidade e mudança do clima.

A seguir, são apresentados alguns dos principais entraves que afetam a efetividade da gestão hídrica no Brasil em um cenário de transformação climática. Esses desafios, embora distintos, estão interligados e demandam abordagens articuladas e sistêmicas. Desde a dificuldade em utilizar cenários climáticos de forma padronizada e prática, passando pela necessidade de lidar com incertezas profundas e marcos legais ainda rígidos, até as fragilidades institucionais, orçamentárias e políticas que ameaçam a sustentabilidade do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), cada um desses pontos representa um aspecto crítico a ser enfrentado com prioridade.

Os desafios elencados evidenciam que a adaptação do setor hídrico à mudança do clima exige mais do que ajustes pontuais ou ações isoladas. Requer uma transformação profunda nos instrumentos legais e de planejamento, no modelo de financiamento, na integração entre políticas públicas e na própria cultura de tomada de decisão. O reconhecimento dessas fragilidades é o primeiro passo para a construção de soluções estruturantes, ancoradas em evidências, flexibilidade institucional, inovação e justiça climática.

i. Padronização e uso de cenários climáticos

- Falta de padronização metodológica dificulta a aplicação de cenários climáticos no planejamento hídrico.
- Escassez de projeções regionais e ausência de downscaling comprometem a utilidade local dos modelos climáticos.
- O SNIRH representa uma alternativa de baixo arrependimento para integrar dados e disseminar metodologias padronizadas.

ii. Gestão das incertezas profundas

- A imprevisibilidade climática demanda abordagens mais robustas e flexíveis de tomada de decisão.
- Adoção de métodos de tomada de decisão sob profunda incerteza (como por exemplo, *robust decision making* e *decision scaling*) que possibilita testar políticas sob múltiplos futuros possíveis.
- A gestão adaptativa, baseada em ciclos iterativos de planejamento e revisão, exige marcos legais que permitam ajustes dinâmicos.

- Estudos de risco são essenciais para subsidiar decisões em contextos incertos, promovendo resiliência institucional.

iii. Rigidez dos marcos legais e regulatórios

- A Lei nº 9.433/1997 e seus instrumentos foram concebidos sob pressupostos de estacionariedade, limitando sua aplicação atual.
- A PNMC ainda não está plenamente integrada à política de recursos hídricos, criando um vácuo regulatório.
- É necessário aprimorar os instrumentos da PNRH (planos de bacia, outorga, enquadramento) para incorporar critérios de adaptação climática, cláusulas adaptativas e revisões periódicas.

iv. Fragmentação institucional e falta de coordenação

- Falta de articulação entre políticas de gestão hídrica, desastres, território e clima dificulta a atuação coordenada.
- Ausência de plataformas integradas de dados, objetivos comuns e canais formais de cooperação reduz a efetividade das políticas públicas.
- O redesenho da governança com foco em sinergias multissetoriais é essencial para promover soluções integradas e preventivas.

v. Implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SbNs)

- Dificuldade em quantificar benefícios das SbNs com métricas reconhecidas pelos sistemas tradicionais de avaliação.
- Ausência de marcos legais, critérios normativos e incentivos financeiros específicos limita sua inserção no planejamento hídrico.
- É necessário desenvolver abordagens híbridas e metodologias padronizadas que valorizem os múltiplos benefícios das SbNs.

vi. Financiamento insuficiente e descontinuado

- O setor de recursos hídricos permanece subfinanciado, com forte dependência de recursos públicos instáveis.

- Usuários e gestores enfrentam dificuldades para acessar linhas de financiamento climático devido à complexidade dos editais e à falta de capacitação técnica.
- Projetos sem incorporação de risco climático limitam o acesso a fundos nacionais e internacionais.
- Guias orientativos claros e acessíveis são necessários para facilitar o acesso a fontes de financiamento da adaptação hídrica.

vii. Fragilidade política e risco para o SINGREH

- A instabilidade institucional, os cortes orçamentários e a rotatividade de equipes enfraquecem o SINGREH.
- Falta de integração entre políticas de água e clima impede a consolidação de uma agenda de adaptação como política de Estado.
- Reformas legais, blindagem orçamentária e governança orientada por evidências são fundamentais para garantir a sustentabilidade das políticas públicas hídricas em um contexto de crise climática.

UM CAMINHO A SEGUIR: INTEGRAÇÃO CIÊNCIA - POLÍTICA PARA A SEGURANÇA HÍDRICA

Para enfrentar os desafios apontados, é fundamental adotar modelos integrados de gestão da água, baseados em dados, que conectem estratégias locais, regionais e nacionais. Estes modelos precisam ser flexíveis, capazes de incorporar mudanças climáticas e de uso do solo, e devem fomentar a colaboração entre setores para garantir coerência nas políticas e eficiência no uso dos recursos.

A adoção consciente de soluções “redundantes” pode, nesse contexto, ser uma vantagem, ao garantir alternativas diante de incertezas. Fortalecer o uso de informações climáticas, por meio de ferramentas como o Monitoramento e “Previsão” de Secas no Brasil, é vital para apoiar políticas públicas e melhorar o gerenciamento de riscos. Melhor comunicação, participação dos atores locais e transparência institucional são essenciais para a preparação e resposta a crises, garantindo que os aspectos técnicos e sociais da gestão da água sejam integrados.

Superar os obstáculos estruturais e operacionais exige uma nova abordagem de gestão hídrica que priorize resiliência, adaptabilidade e in-

clusão, indo além da eficiência técnica tradicional. Modelos orientados por dados e apoiados por ampla participação social são fundamentais para construir sistemas hídricos sustentáveis, capazes de enfrentar as incertezas de um clima em transformação e atender às necessidades hidrológicas e humanas.

Responder aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos requer mais do que gerar novos dados ou desenvolver tecnologias: é preciso garantir que o conhecimento científico se traduza em ação concreta, orientando políticas e decisões no tempo certo. Essa aproximação ainda enfrenta barreiras — diferenças de linguagem, ritmos e prioridades — que reduzem o potencial de respostas integradas e efetivas.

Enquanto a ciência oferece diagnósticos sólidos, cenários prospectivos e soluções inovadoras, a gestão opera sob pressões imediatas, restrições orçamentárias e exigências políticas. Reduzir esse descompasso implica investir em canais permanentes de diálogo, consolidar a confiança entre atores e reconhecer o papel estruturante da ciência na formulação de políticas públicas.

A governança adaptativa deve ir além da formalidade institucional e assumir o papel de articulação viva entre diferentes saberes e setores, capaz de lidar com riscos e incertezas. Aproximar ciência e políticas públicas não é apenas uma estratégia técnica, mas um compromisso político e social com a segurança hídrica e com a construção de um futuro mais resiliente.

Integrar evidências científicas ao núcleo das decisões sobre água amplia a capacidade de resposta, potencializa a resiliência dos sistemas de gestão e protege, de forma sustentável, um recurso vital à vida e ao desenvolvimento. O desafio — e também a oportunidade — está em fazer dessa integração uma prática constante, para que a melhor ciência disponível não apenas informe, mas impulsionne ações concretas na ponta.

Nesse processo, as associações técnicas e científicas desempenham papel estratégico. No Brasil, a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS) e a Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ABID) têm contribuído para a difusão de conhecimento, a formação de profissionais e o diálogo entre ciência, sociedade e políticas públicas. Sua atuação é essencial para fortalecer a governança, promover inovação e ampliar a participação social nas agendas de adaptação e resiliência.

Em escala internacional, iniciativas como a International Association of Hydrological Sciences (IAHS) e sua atual Década Científica HEL-PING (Hydrology Engaging Local People IN one Global world, 2023-2032), reforçam a necessidade de aproximar ciência e prática, construindo soluções em parceria com comunidades locais. Alinhar os esforços nacionais a esses movimentos globais amplia a capacidade do Brasil de enfrentar os impactos da crise climática sobre a água e de avançar rumo a uma segurança hídrica sustentável.

A relevância conceitual das questões relativas à mitigação de emissões e adaptação tomou uma dimensão de estratégia nacional de planejamento em Ciência, Tecnologia e Inovação. A Conferência Livre “Segurança Hídrica e Sociedade” (2024), com a organização conjunta do INCT ONSEAdapta e a ABRHIDRO, sintetizou uma contribuição relevante voltada às políticas públicas, com a inserção dessa temática na 5a Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (5a CNCTI -<https://5cncti.org.br/>), em 2024, que configurou *“um importante espaço de diálogo entre diferentes atores da sociedade para refletir sobre o papel da CT&I no país e seu rumo nos próximos anos”*.

REFERÊNCIAS

- Almeida, C. Water quality management, Governance, and Socio-hydrology: strategies for an Urban Basin. Thesis. Federal University of Paraná. 271p. 2024.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH). Brasília, 2019a. 112 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2022.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2024.
- Arias, P.A., et al. (2021). Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144, doi:10.1017/9781009157896.002.
- Benso, M. R., Gesualdo, G. C., Silva, R. F., Silva, G. J., Castillo Rápalo, L. M., Navarro, F. A. R., Marques, P. A. Marengo, J. A., Mendiondo, E M (2023), Review arti-

cle: Design and evaluation of weather index insurance for multi-hazard resilience and food insecurity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*,

Benso, M. R., Silva, R. F., Chiquito Gesualdo, G., Saraiva, A. M., Delbem, A. C. B., Marques, P. A. A., Marengo, J. A., and Mendiondo, E. M. (2025) A data-driven framework for assessing climatic impact drivers in the context of food security, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 25, 1387–1404, <https://doi.org/10.5194/nhess-25-1387-2025>.

Blöschl, G., Chaffe, P.L.B., Water scarcity is exacerbated in the south. *Science*382, 512-513 (2023). DOI:10.1126/science.adk8164.

Borges De Amorim, P.; Silva De Souza, K. I.; Chaffe, P. L. B. (2020) A web-based tool for synthesis assessments of the impacts of climate change on water resources. *Environmental Modelling & Software*, v. Online First, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104848>

Borges, PB, Chaffe, P.B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. *Climatic Change* 155, 37–57 (2019). <https://bit.ly/429nust>

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2024. 154 p.

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023 : informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.- Brasília : ANA, 2023. 118 p.

Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.-- Brasília : ANA, 2022. 132p.

Bréda, J. P. L. F.; Paiva, R.C.D. et al., (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *CLIMATIC CHANGE*, v. 158, p. 1-20, 2020.

Bréda, J. P. L., de Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., & Collischonn, W. (2023). Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, 619, 129284.

Canamary, E. C.; Reis Junior, Dirceu Silveira; Martins, Eduardo Sávio P. R. Evaluation of ensemble SPI forecasts for Ceará, Northeastern Brazil. In: *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Editors: Joaquin Andreu, Abel Solera, Javier Paredes-Arquiola, David Haro-Monteagudo, Henny van Lanen. CRC Press, DOI: 10.1201/b18077-42, 2015.

Cancelliere, A., Mauro, G. D., Bonaccorso, B., & Rossi, G. Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index. *Water Resources Management*, 21(5), 801–819. <http://doi.org/10.1007/s11269-006-9062-y>, 2006.

CEMADEN (2024). Nota Técnica Nº 679/2024/SEI-CEMADEN: Análise das Secas no Brasil: Diagnóstico e Projeções Futuras. Brasília: CEMADEN

Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., and Siqueira, V. A.: CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2075–2096, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020>, 2020.

Chagas, V.B.P., Chaffe, P.L.B. & Blöschl, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nat Commun* 13, 5136 (2022a). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>

Fava, M C, Abe, N, Restrepo-Estrada, C E, Kimura, B, Mendiondo, E M (2018) Flood Modelling Using Synthesized Citizen Science Urban Streamflow Observations, *Journal of Flood Risk Management*, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12498>

Furquim, G., Pessin, G., Faisal, B., Ueyama, J., Mendiondo, E M (2016) Improving the accuracy of a flood forecasting model by means of machine learning and chaos theory, *Neural Computing and Applications* 27(5): 1129–1141, <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1930-z>.

Gesualdo, G. C., M R. Benso, K Sass, E M Mendiondo (2024) Index-based insurance to mitigate current and future extreme events financial losses for water utilities, *Int. J. Dis. Risk Reduction*, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104218>

Gutiérrez, A.P.A.; Engle, N.L.; de Nys, E.; Molejón, C.; Martins, E.S. Drought preparedness in Brazil. *Weather Clim. Extrem.*, 3, 95–106, 2014.

Guzman, D A, Mohor, G S, Mendiondo, E M, (2020) Multi-Year Index-Based Insurance for Adapting Water Utility Companies to Hydrological Drought: Case Study of a Water Supply System of the Sao Paulo Metropolitan Region, Brazil, *Water*, <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/2954>

Hirata, R. e Conicelli, B. P. . Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. *Anais da ABC*, v. 84, n. 2, p. 297-312.

Hirata, R., Goodarzi, L., Rörig, F.S. et al. Climate change impacts on groundwater: a growing challenge for water resources sustainability in Brazil. *Robust decision making* 197, 784 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14235-8>.

Horita, F, Albuquerque, J P, Degrossi, L C, Mendiondo, E M, Ueyama, J, (2015) Spatial decision support system for flood risk management in Brazil with volunteered geographic information and wireless sensor networks, *Computers & Geosciences* 80: 84-94, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.001>

Horita, F, Albuquerque, J P, Marchezini, V, Mendiondo, E M (2017) Bridging the gap between decision-making & emerging big data sources: Application of model-based framework to disaster management in Brazil, *Decision Support Systems*, <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.03.001>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Dados populacionais e distribuição regional no Brasil. Rio de Janeiro, 2023.

Kozak, Caroline ; Leithold, Juliana ; do Prado, Luciane Lemos ; Knapik, Heloise Garcia ; de Rodrigues Azevedo, Júlio César ; Braga, Sérgio Michelotto ; Fernandes, Cristovão Vicente Scapulatempo . Adaptive monitoring approach to assess dissolved organic matter dynamics during rainfall events. ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT, v. 193, p. 423, 2021.

Kreibich, H., Van Loon, A.F., Schröter, K. et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature* 608, 80–86 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5>

Lavaysse, C., Vogt, J., & Pappenberger, F. (2015). Early warning of drought in Europe using the monthly ensemble system from ECMWF. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7), 3273–3286. <http://doi.org/10.5194/hess-19-3273-2015>

Martins, Eduardo S. P.R., Vulnerabilidades e desafios para a segurança hídrica (regiões e setores) e arranjos de governança, Em: Mudanças Climáticas: Adaptação, Resiliência e Controle de Riscos, PAINEL – 2º FÓRUM BRASIL DAS ÁGUAS, João Pessoa, 2025.

Martins, Eduardo Sávio P.R. An analysis of past seasonal forecasts for the Northeast Region: Why do we need to change our Climate Forecasting System? (In Portuguese). In: XIV International Climate Assessment Workshop for the Northeast Region, Fortaleza, 2012.

Martins, Eduardo Sávio P.R.; Reis Junior, Dirceu Silveira. Drought impacts and policy responses in Brazil: The Case of the Northeast Region. In: GAR Special Report on Drought, 2021, ed.1. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021.

Martins, Eduardo Sávio P.R.; Teixeira, Francisco José Coelho; Conejo, João Gilberto Lotufo; Machado, José; Moura, Antônio Divino. Crisis, Opportunity, and Leadership,. In Drought in Brazil: Proactive Management and Policy, CRC Press, 19-26, 2016a.

MCTIC. Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações. ENCTI 2016-2022. 2016.

Miranda, P. T., Petry, I., Alves, W. R. G., Fernandez, G. M. R., Paiva, R. C. D., Collis-chonn, W., Fagundes, H., Rossi, J. B., Kolling Neto, A., Abdalla Araujo, A., & Souza, S. (2024). SACCI-CMIP6: South American Climate Change Impacts on floods and droughts (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15398093>

Mohor, G. S., Mendiondo, E M (2017) Economic indicators of Hydrologic Drought Insurance Under Water Demand & Climate Change Scenarios in a Brazilian Context, *Ecol. Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.014>

OMM - Organização Meteorológica Mundial (2023) Early Warnings for All Initiative. Geneva: OMM, <https://wmo.int/activities/early-warnings-all>

Oodarzi, L. ; Hirata, R. ; Andrade, L. C. . Managed aquifer recharge in São Paulo state, Brazil: opportunities for facing global climate change issues. Environmental Earth Sciences, v. 83, p. 666, 2024.

Paiva RCD de, Chaffe PLB, Anache JAA, Fontes AS, Araujo LMN de, Araujo AN de, et al.. Advances and challenges in the water sciences in Brazil: a community synthesis of the XXIII Brazilian Water Resources Symposium. RBRH. 2020;25:e50. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200136>

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Miranda, P. T., Fagundes, H.O., W., Kolling, A., Castro, L., Rossi, J., Matte, G., Laipelt, L., Alves. W, Petry. I (2024). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3.

Pereira, José Marcelo Rodrigues; Vasconcelos Júnior, Francisco das Chagas; Martins, Eduardo Sávio P. R.; Reis Júnior, Dirceu Silveira; Noronha, Aurélio Wilson Tavares. Climate Seasonal Forecast and derived Indexes for droughts in Ceará, Brazil. In: Drought: Research and Science-Policy Interfacing. Editors: Joaquin Andreu, Abel Solera, Javier Paredes-Arquiola, David Haro-Monteagudo, Henny van Lanen. CRC Press, DOI: 10.1201/b18077-53, 2015.

Petry, I., Miranda, P. T., Paiva, R. C. D. D., Collischonn, W., Fan, F. M., Fagundes, H. D. O., ... & Souza, S. (2025). Changes in flood magnitude and frequency projected for vulnerable regions and major wetlands of south America. Geophysical Research Letters, 52(5), e2024GL112436. <https://doi.org/10.1029/2024GL112436>

Prudhomme, C., Shaffrey, L., Woolings, T., Jackson, C., Fowler, H, Anderson, B. (2015). IMPETUS: Improving Predictions of Drought for User Decision-Making. In: Andreu et al. (Eds.), Drought: Research and Science-Policy Interfacing. Taylor & Francis Group, London, p. 273-278.

Prudhomme, C., Shaffrey, L., Woolings, T., Jackson, C., Fowler, H, Anderson, B. (2015). IMPETUS: Improving Predictions of Drought for User Decision-Making. In: Andreu et al. (Eds.), Drought: Research and Science-Policy Interfacing. Taylor & Francis Group, London, p. 273-278.

Ramirez, S. B., Meerveld, I., Seibert, J. Citizen Science approaches for water quality measurements. Science of Total environment, 897, 2023.

Restrepo-Estrada, C. E., Andrade, S., de Albuquerque, J P, Mendiondo, E M (2018_ Geo-social media as a proxy for meteorological data for flood monitoring, Computer and Geosciences, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.010>

Ribeiro, N. B.; Formiga-Johnsson, R. M. Discussões sobre governança da água: tendências e caminhos comuns. Ambiente & Sociedade, v. 21, 2018.

- Sarmento-Buarque, A C, Souza, C. F., Souza, F. A. A., Mendiondo, E M et al (2021) Urban flood risk under global changes: a socio- hydrological and cellular auto- mata approach, *Hydrol. Sci. J.*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1977813>
- Schroeter, S.A., Orme, A.M., Lehmann, K. et al. Hydroclimatic extremes threaten groundwater quality and stability. *Nat Commun* 16, 720 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-55890-2>
- Scott, C. A.; Meza, F. J.; Varady, R. G.; Tiessen, H. ; Garfin, J. M.; Wilder, G. M.; Farfán, L. M.; Pablos, N. P. ; Montaña, E. (2013) Water Security and Adaptive Management in the Arid Americas, *Annals of the Association of American Geographers*, 103:2, 280-289.
- Shafiee-Jood, M., Cai, X., Chen, L., Liang, X.-Z., & Kumar, P. Assessing the value of seasonal climate forecast information through an end-to-end forecasting framework: Application to U.S. 2012 drought in central Illinois. *Water Resources Research*, 50(8), 6592–6609. <http://doi.org/10.1002/2014WR015822>, 2014.
- Silva, R. F.; Benso, M. R.; Gesualdo, G. C.; Mendiondo, E M.; SAraiva, A. M.; MAR-Ques, P. A. A.; Delbem, A C. B. (2021) Multi-objective methods for crop insurance premiums: framework proposal and a case study in sugarcane. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA (SBIAGRO), 13. , 2021, Anais [...]. Porto Alegre: Soc. Bras. Compt, 2021 . p. 225-233. ISSN 2177-9724. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbiagro.2021.18394>.
- Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS. Abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil. Brasília, 2022.
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., et al. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., et al. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>
- Souza Filho, F.A., Lall, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceará, Brazil: Applications of a multivariate, semiparametric algorithm. *Water Resources Research*, 39 (11), 1307, doi:10.1029/2002WR001373, 2003.
- Souza, F F A, Bhattacharya-Mis, N., Sarmento-Buarque, A. C., Taffarello, D, Mendiondo, E M et al, Blue and grey urban water footprints through citizens' perception and time series analysis of Brazilian dynamics, *Hydrol. Sci. J.*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1879388>
- Souza, I. A., Silva, V. A. (2025) Flood prediction in Brazil: A review of trends, gaps and methodological perspectives, *J. S. Am. Earth Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105637>

- Steinemann, A. C. Using climate forecasts for drought management. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(10), 1353–1361, 2006.
- Sun, L., Moncunill, D. F., Li, H., & Moura, A. D. Climate downscaling over Nordeste, Brazil, using the NCEP RSM97. *Journal of Climate*, 18(4), 2005.
- Taffarello, D., Sass, K., Bittar, M., Mendiondo, E M (2020), Ecosystem Service Valuation Method through Grey Water Footprint in Partially-Monitored Subtropical Watersheds, *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139408>
- Uchôa, J.G.S.M., Oliveira, P.T.S., Ballarin, A.S. *et al.* Widespread potential for streamflow leakage across Brazil. *Nat Commun* 15, 10211 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54370-3>
- UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília]. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/279716>
- UNESCO (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. 139 p. ISBN 978-92-3-100264-9.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR (2021). GAR Special Report on Drought 2021. Geneva.
- Vörösmarty, C. J.; Osuna, V. R.; Cak, A. D.; Bhaduri, A.; Bunn, S. E.; Corsi, F.; Uhlenbrook, S. Ecosystem-based water security and the sustainable development goals. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 18, n.4, p. 317-333, 2018.
- Werner, M., Vermooten, S., Iglesias, A., Maia, R., Vogt, J., Nauman, G. Developing a Framework for Drought Forecasting and Warning: Results of the DEWFORA Project. In: Andreu *et al.* (Eds.), *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. Taylor & Francis Group, London, p. 279-286, 2015.
- Wilhite, D.A., Hayes, M.J., Knutson, C.L., Drought preparedness planning: building institutional capacity. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 93-135, 2005.
- Wood, E. F., Schubert, S. D., Wood, A. W., Peters-Lidard, C. D., MO, K. C., Mariotti, A., & Pulwarty, R. S. Prospects for Advancing Drought Understanding, Monitoring, and Prediction. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1636–1657. 2015.
- WWAP (UN World Water Assessment Programme). The UN World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO, 2015.
- Young, G.; Demuth, S.; Mishra, A.; Cudennec, C. Hydrological sciences and water security: An overview. *PIAHS-366*, pp. 1- 9, 2015.