

Brasil, maio de 2023.

RELATÓRIO TÉCNICO

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Análise do impacto das mudanças climáticas globais sobre as bacias hidrográficas e o regime hidrológico no Brasil e projeções futuras.

Autores: Dr. José Wanderley Marangon Lima, Dr. Lincoln Muniz Alves e Dr. José Antonio Marengo.

Realização: Coalizão Energia Limpa.

Organização: ClimalInfo.

Apoio: Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (Idec), Instituto Clima e Sociedade (iCS), Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema), Instituto de Estudos Socioeconômicos (Inesc), Instituto Internacional Arayara e Instituto Pólis.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

SUMÁRIO

| | | |
|---|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 3 |
| 2 | CLIMA DO PRESENTE..... | 3 |
| 3 | MUDANÇAS CLIMÁTICAS..... | 11 |
| 4 | ESTUDOS DOS IMPACTOS DO CLIMA NAS VAZÕES PARA AS PRINCIPAIS BACIAS DO BRASIL..... | 21 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 24 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 29 |

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

1 INTRODUÇÃO

A mudança do clima constitui um dos maiores desafios a serem enfrentados na atualidade, que demanda preparação e respostas em todos os níveis de governança. Nessa conjuntura, é de central importância a articulação de esforços para o planejamento de medidas que possam reduzir os riscos e danos associados a esse fenômeno em particular para o setor elétrico brasileiro que é totalmente dependente das condições climáticas. Por exemplo, em 2021, o Brasil enfrentou e ainda enfrenta uma das piores secas em 90 anos na baía do Paraná-Prata causando a redução a níveis críticos dos reservatórios das hidrelétricas do Centro-Oeste e do Sul.

A análise da variabilidade climática é uma atividade chave para identificar riscos e oportunidades atuais e futuros relacionados à mudança do clima e é um passo imprescindível para identificar medidas de adaptação para redução de riscos. Nesse sentido, o presente relatório é oferecido como recurso de orientação e apoio para compreensão das condições climáticas atuais e futuras nas diversas regiões do Brasil, de modo a contribuir para o debate da construção de um novo modelo para o setor elétrico ancoradas em informações técnicas.

O foco desse relatório será propiciar insumos técnico-científicos sobre como a mudança do clima pode potencialmente impactar o setor energético brasileiro. Este trabalho, é compreendido em duas partes, onde a primeira destina-se a caracterização do clima presente. As projeções futuras e seus impactos serão abordados na segunda parte.

2 CLIMA DO PRESENTE

Antes de descrever as projeções futuras é fundamental discutir a variabilidade do clima do passado e como isso pode ser explicado.

O clima da Terra está em constante mudança em diversas escalas. No contexto de longo prazo, os estudos paleoclimáticos – relativos ao clima que precede o período instrumental – revelam que as temperaturas globais mudam substancialmente em escalas de tempo de cem mil anos, à medida que o clima se move de eras glaciais para interglaciais e são provavelmente iniciadas por diferenças sutis na órbita da Terra e inclinação do eixo em torno do Sol, conhecido como os ciclos de Milankovitch (Oliveira et al., 2017).

Além das variações solares e orbitais terrestres, as variações na composição da atmosfera e do uso e ocupação dos solos representam um fator importante de alteração do balanço de radiação terrestre, cuja consequência implica mudanças climáticas em diferentes

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

escalas temporais e espaciais relacionadas diretamente às ações humanas atribuído às emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, as características geográficas regionais (por exemplo, latitude, vegetação natural, solos, elevação ou proximidade de grandes massas de água) determinam as peculiaridades das regiões e definem as zonas climáticas bem conhecidas em todo o mundo

- o mapa de classificação climática Köppen-Geiger (disponível em <http://koeppen-gei-ger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>). Este foi atualizado por Rubel e Kottek (2010) com base nas observações de temperatura e precipitação para o período de 1951 a 2000, destacando os limites de cinco zonas climáticas globais – polar, neve, temperado quente, árido e equatorial em cada continente.

Há evidências contundentes de que as atividades humanas estão alterando profundamente o clima da Terra, e o aquecimento está ocorrendo a uma taxa sem precedentes, chegando a 1.1 °C desde o início da era industrial em 1850 (IPCC, 2021).

Compreender a variabilidade climática, suas causas, impactos potenciais e, sobretudo, sua previsibilidade, são o objetivo de uma parcela significativa da comunidade científica dedicada às ciências ambientais.

O Brasil apresenta condições de tempo e clima tropical, subtropical e extratropical, pela sua localização entre 10 °N e 60 °S. Apresenta características geográficas importantes, como a floresta Amazônica (que abrange 35% da extensão total e 65% da área tropical), regiões desérticas e áridas como o deserto do Atacama no Chile e o Nordeste do Brasil (NEB), uma cadeia montanhosa que cobre a faixa oeste do continente, a Cordilheira dos Andes, e está situada entre dois grandes oceanos, o Atlântico e o Pacífico. As características geográficas juntamente com fatores remotos contribuem para que uma variedade de sistemas atmosféricos atue sobre a AS.

A análise das tendências climáticas observadas no Brasil nas últimas quatro décadas revela um aumento da temperatura em todas as regiões brasileiras. Em geral, verificou-se aumento de 0,5 ° C por década nas temperaturas mínima e máxima médias, chegando a 1 °C em certas regiões no inverno e primavera. Essa tendência é acompanhada de um aumento no número de dias com temperatura máxima extrema, com incremento superior a 30% em praticamente todo o país (Santos et al., 2020).

No tocante a precipitação observou-se mudanças regionais significativas tanto de redução quanto de aumento da precipitação anual. Reduções (de até 20 mm) no acumulado anual foram observadas no sudoeste da região Norte, no leste da região Centro-Oeste, e nas regiões Nordeste e Sudeste. Incrementos foram observados no extremo norte da região Norte (de até 40 mm), na região Sul (de até 20 mm) e em áreas nas regiões Nordeste e Centro-

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Oeste. As observações também indicam aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, tais como aumento de secas em extensa área da porção central do país (Santos et al., 2020).

A Figura 1 mostra a série temporal do índice de Precipitação Padronizado (do acrônimo em inglês *Standard Precipitation Index* – SPI), comumente utilizado para o monitoramento de condições associadas a secas e excesso de chuva, observada no Brasil para 12 meses (SPI- 12). O SPI-12 mostra que desde o ano 2000 todas as regiões apresentam SPI negativos o que representa uma tendência de reduções de chuva, em comparação com a década de 1960 ou 1970. Esta tendência parece ser mais intensa nos últimos 10 anos. A seca plurianual no Nordeste que começou em 2012, as secas de 2005, 2010 e 2015-16, assim como as secas no Pantanal na região centro oeste e no sul são bem ressaltadas.

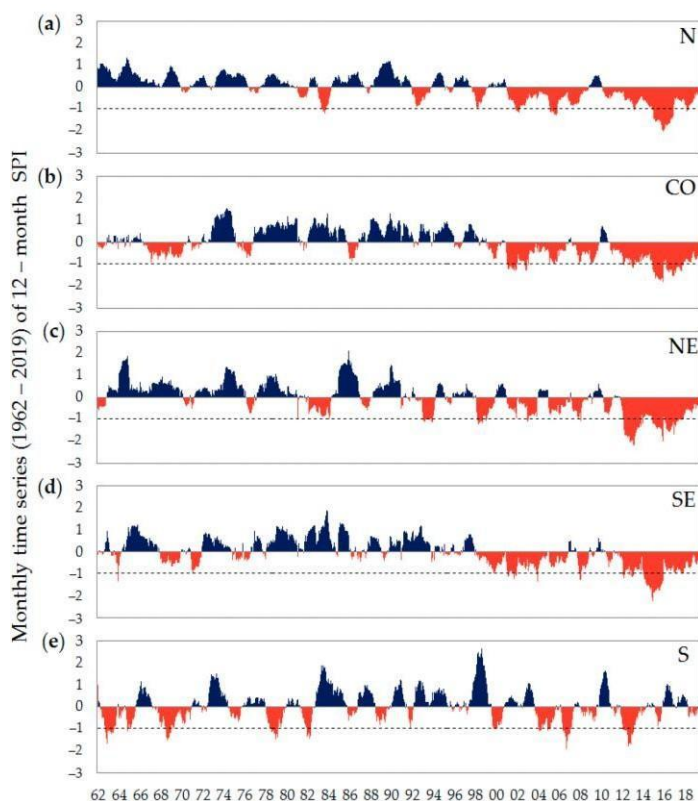


Figura 1 – Variação mensal do SPI-12 de 1962-2019 para as regiões do Brasil: (a) N: Norte; (b) CO: Centro Oeste; (c) NE: Nordeste; (d) SE: Sudeste, e (e) Sul. Fonte: Cunha et al., (2019)

Num contexto espacial a Figura 2 mostra o Índice Integrado de Seca – IIS (Cunha et al., 2019) calculado para os anos hidrológicos de 2012 a 2021 sobre o Brasil, e permite identificar as secas nas principais bacias do Brasil. O pico da estação chuvosa, na maior parte

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

do Brasil é de outubro a setembro. Especialmente de 2015 a 2017, as secas afetaram a maior parte do Brasil. No período de 2012 a 2018 apresentou a condição de seca mais severa na maior parte do nordeste e foi classificada como seca extrema e, em algumas partes do semiárido central, como seca excepcional (Marengo et al., 2017; Alvala et al., 2017). Em 2011/2012, a seca na região foi registrada em quase 60% do IIS entre extremos (25%) e grave (32%), com poucas áreas de condições anormais ou normais. A condição de seca manteve-se intensa em 2012/2013 (22,3% do Nordeste em seca severa) e persistiu ao longo dos anos seguintes. Em 2015/2016, um forte evento El Niño aumentou e prolongou o efeito da seca sobre o nordeste. O El Niño 2015/2016 foi um dos mais fortes do recorde, comparável ao de 1982/1983 e 1997/1998. Embora a grande maioria das secas severas tenham ocorridas no Nordeste e está associado à ocorrência de El Niño, nem sempre é o caso, como no início da seca pluri-anual no nordeste em 2012. Uma característica peculiar deste evento pluri-anual é que também foram observadas condições de seca além dos limites do semiárido, e a seca se estendeu para a região norte e centro-oeste.

Na região amazônica, embora as condições de seca mais severas não tenham sido observadas na maioria do período avaliado, como ocorreu no Nordeste, foram observadas condições de seca intensa e generalizada principalmente para o ano hidrológico de 2014/2015 e 2015/2016. A seca 2015/2016 foi uma consequência das condições extremas de calor e seca causadas pelo evento El Niño. Embora a região norte seja conhecida por seus maiores índices pluviométricos entre as regiões brasileiras, registrou alta frequência de secas severas em 2014/2015 (43,5% da região) e 2015/2016.

Os eventos de El Niño também são associados à ocorrência de secas na Amazônia devido à supressão da convecção e, assim, chuvas no norte, leste e oeste da Amazônia. A gravidade e a extensão principalmente da seca de 2015/2016 na região amazônica superou a severidade das secas de 2005 e 2010 (Jimenez-Muñoz et al., 2019; Espinoza et al., 2022, Marengo et al., 2021).

O sudeste do Brasil e a bacia do Paraná experimentaram secas que começaram em 2014 e que em certa forma continuam até 2022, ainda que tenha ocorrido 1 ou 2 meses muito chuvosos que melhoraram os níveis dos reservatórios e UHEs, mas a situação de seca ainda persiste até o presente. Na região Sudeste, o período mais seco ocorreu de 2013/2014 a 2014/2015, quando a intensidade das secas foi de extrema a moderada. Em 2013/2014, registrou-se um pico de 42,6% de seca e 23,4% de seca moderada. Após 2017/2018, houve predominantemente alterações anormais e condições normais. Esses eventos no Sudeste foram desafiadores para setores estratégicos, devido a uma grave crise hídrica (Marengo et al., 2015; Cuartas et al., 2022; Deusdara-Leal 2022). O Sistema de Abastecimento de Água da Cantareira, por exemplo, que está localizado nesta região, e é o mais importante sistema

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo, enfrentou sua pior escassez de água neste período. Durante este evento, o volume morto do reservatório foi usado de 12 de julho de 2014 a 30 de dezembro de 2015 (537 dias) afetando mais de 8,8 milhões de pessoas.

A Figura 2 também mostra que em 2012 e de 2017 a 2021, a maior parte da região sul do Brasil apresentou condições seca em uma área extensa, com a maior intensidade registrada em 2017, 2020 e 2021 (Naumann et al., 2021). A maior parte da região sul experimentou um esgotamento substancial de águas superficiais e subterrâneas em 2012. Devido a esta seca, de acordo com o Sistema Integrado de Informação de Desastres, o Governo Federal reconheceu a situação de emergência em 70% dos municípios (378 no total) do Rio Grande do Sul. Tal reconhecimento permite que os municípios solicitem o apoio do Governo Federal para medidas para enfrentar o período de escassez de água.

Na região centro oeste anos de 2015-2017 apresentaram situação de seca severa a extrema. Nesta região, a frequência de secas severas e moderadas aumentou gradativamente desde 2011/2012, com oscilação entre 2014/2015 e 2017/2018, atingindo seu pico em 2014/2015 (37,4% de seca severa e 26% de seca moderada). A partir de 2018 o Pantanal apresentou deficiência de chuvas que levou a seca extremas a partir de 2019 e que continua em 2022.

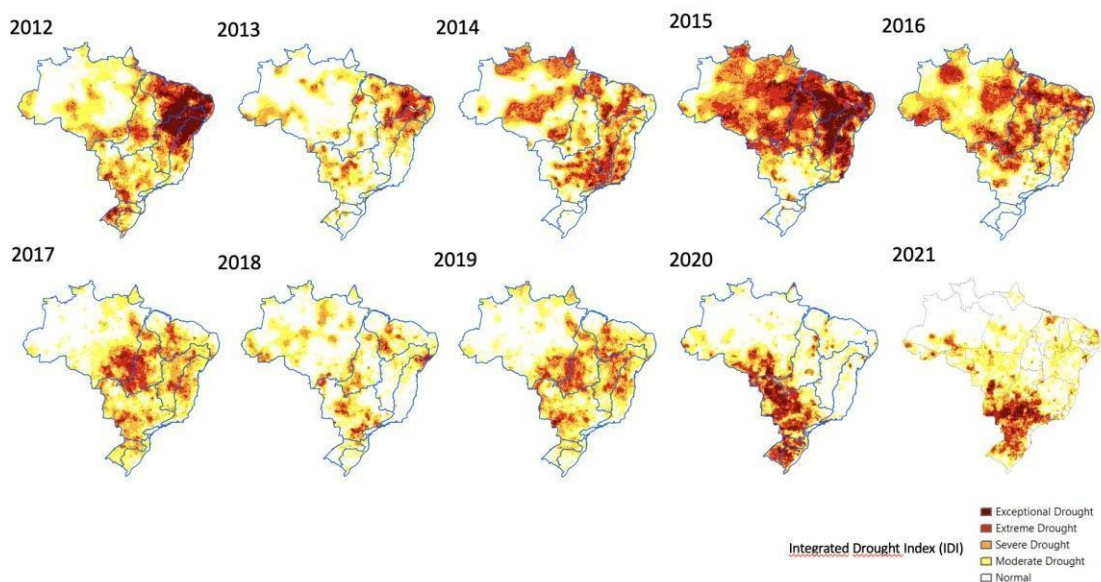


Figura 2 – Mapas do índice integrado de seca (IIS) para o Brasil de 2012 até 2021. As principais bacias aparecem delimitadas nos mapas. Escala de cores aparece na parte inferior direita.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De fato, o Brasil sofreu as piores secas da história registrada na última década, resultando em graves impactos socioeconômicos e ambientais. O país depende muito dos recursos hídricos, com 77,7% da água consumida pela agricultura (irrigação e pecuária), 9,7% pela indústria, e 11,4% para abastecimento humano. As usinas hidrelétricas geram cerca de 64% de toda a eletricidade consumida.

Atualmente o Sistema Cantareira encontra-se em estado de atenção. O Reservatório atingiu 33% de seu volume útil em 31 de agosto de 2022, na faixa de operação “Alerta” (armazenamento entre 30% e 40%). Esse valor representa uma redução de 3% em relação ao mês anterior, e situação pior que no mesmo período pré-crise (47,8%, no final de agosto de 2013), como observado na Figura 3. Ainda no mês de agosto de 2022, choveu cerca de 16% acima da média histórica, e a vazão média registrada foi 11 m³/s, o que representa, em termos percentuais, 53% da média histórica. Ressalta-se que as vazões registradas no Sistema Cantareira se mantêm abaixo da média histórica desde janeiro de 2021 (exceto janeiro/2022, quando foi registrado valor em torno da média).



Figura 3 – Evolução do volume armazenado (%) nos reservatórios do Sistema Cantareira para o dia 31 de agosto de 2013 a 2022. Fonte: CEMADEN

No tocante às tendências hidrológicas observadas, observou-se que em 2001 e a partir de 2013-14 o Brasil enfrentou as piores crises hídrica dos últimos 90 anos. O SSFI (*Standardized Streamflow Index*) é um índice desenvolvido utilizando valores mensais de

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

vazão e os métodos de normalização associados ao SPI. Pode ser calculado para dados observados e previstos, fornecendo uma perspectiva sobre períodos de alta e baixa vazão associados a secas e cheias. Parâmetros de entrada são dados de vazão em escala diária ou mensal. É aplicado no Monitoramento de condições hidrológicas em múltiplas escalas de tempo (Modarres 2007, Telesca et al., 2012). Este índice é usado pelo CEMADEN no monitoramento mensal de condições hidrológicas nas principais bacias hidrográficas do país para avaliar segurança hídrica.

No Nordeste (Figura 4), consistentes com as Figura 1 e Figura 2, nas UHEs (*Usinas Hidroeletricas*) da Bacia do Rio São Francisco, observa-se o impacto das secas que afetaram a região sudeste e centro-oeste desde 2014, e a seca que afetou a região nordeste desde 2012, continuando em situação de seca até meados de 2022. Os valores de SSFI apontam para seca severa. Algo similar foi observado na escala interanual durante os eventos de El Niño de 1986-87, 1997-98 e 2001, e de 2015-16. A Figura 4b mostra situação similar na bacia do Paraná, onde em algumas sub bacias e UHEs em 2022 a situação de seca varia de severa a excepcional, e novamente começando em 2013. Parece ser que a seca e crise hídrica que começaram em 2013 ainda continua até o corrente ano. No Sudeste e Centro oeste (Figura 4c) a situação já foi pior de 2012 a 2021, com tendência a recuperar em 2022, ainda que a recuperação seja fraca em termos de SSFI. No caso do Sistema Cantareira (Figura 4d), nas diferentes UHEs a situação até 2022 varia de seca severa a excepcional. Esta situação começou em 2013 e vai até 2022, com uma pequena recuperação em 2016, devido a chuvas acima do normal em janeiro 2016. Isso aparece nas series de SPI-12 e SSFI-12. Situações similares foram reportadas durante a crise hídrica de 2001.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

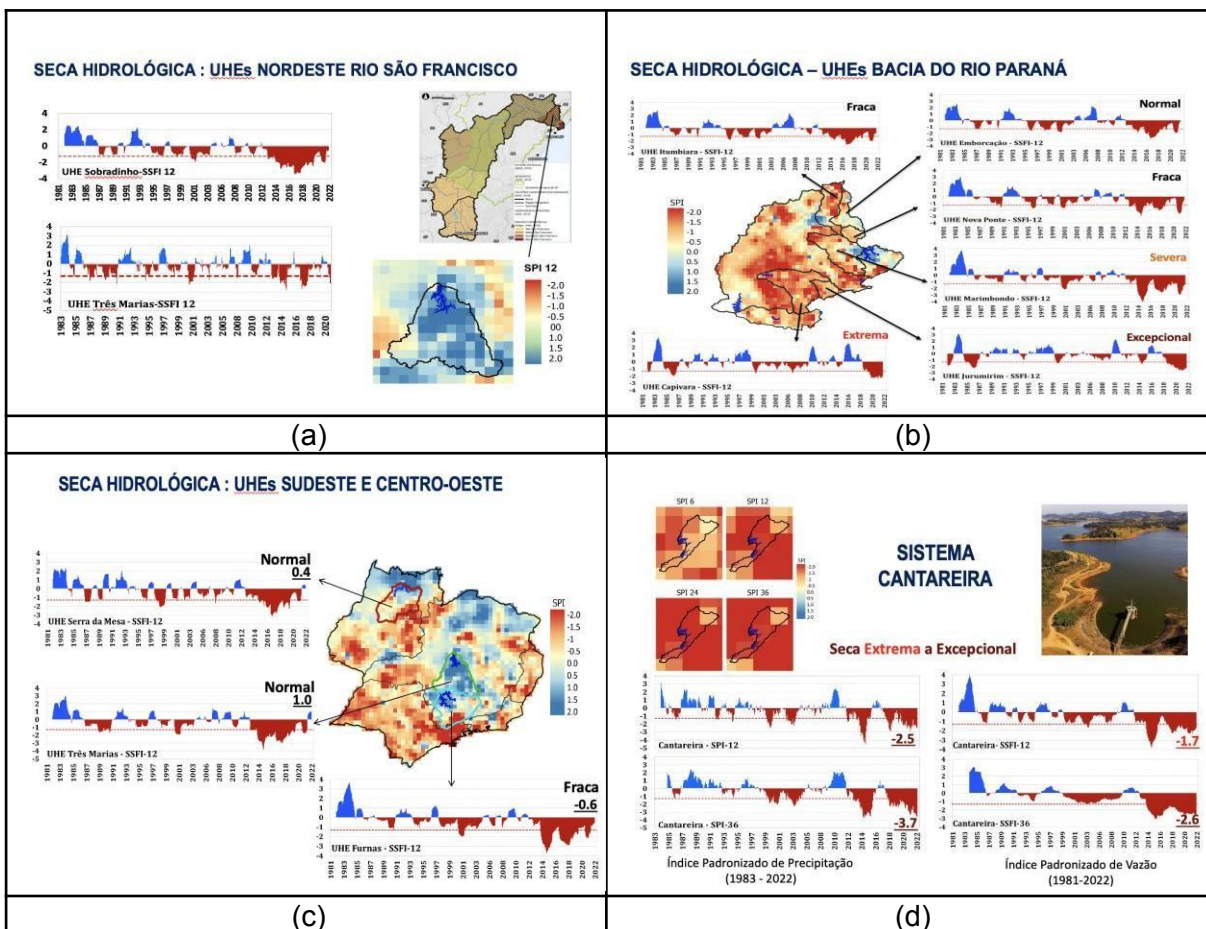


Figura 4 – Monitoramento hidrológico nas principais bacias do país, usando SPI e SSFI para: (a) Bacia do São Francisco, (b) Bacia do Paraná, (c) Bacias do Sudeste e Centro Oeste, (d) Sistema da Cantareira. Fonte: CEMADEN

Os resultados mostram que desde a seca ocorrida em 2014/2015 sobre a região Sudeste do Brasil, várias bacias foram fortemente impactadas e permanecem em estado crítico até agora. Seguindo este evento, outras regiões sofreram secas, com déficit crítico de chuvas e altas temperaturas, causando um impacto pronunciado na disponibilidade hídrica em muitas das bacias estudadas. A maioria das usinas hidrelétricas encerram a estação chuvosa de 2020-2021 operando com uma fração de sua capacidade total, e assim a geração hidrelétrica do país estava sob regime crítico (Cuartas et al., 2022).

Estas tendências refletem a variabilidade natural do clima, com possíveis impactos do El Niño, La Niña ou o gradiente de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Tropical. Os recentes relatórios do IPCC (IPCC 2021, 2022) sugerem que este tipo de mudanças nos padrões hidro-meteorológicos tem fortes indícios de impactos das atividades humanas no aquecimento global. O aumento nas emissões de gases de efeito estufa e aumento no desmatamento da Amazônia poderiam amplificar os extremos de clima, levando a situações de secas e chuvas intensas mais frequentes. Certamente isso levou a crises

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

hídricas como a de 2001 e de 2013-14 e que continua até o momento. As possíveis soluções para minimizar futuras crises hídricas devem ser parte da transição energética do Brasil e do cumprimento dos compromissos junto ao Acordo de Paris.

3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nas últimas décadas, o tema “*mudanças climáticas*” tem despertado interesse na sociedade e na comunidade científica devido aos seus amplos impactos sobre os ecossistemas naturais e a sociedade humana. Até o momento, o crescimento e o aprimoramento do conhecimento de uma vasta quantidade de estudos são baseados em sólidos fundamentos físico-teóricos, e as observações de longo prazo nos forneceram resultados robustos e confiáveis. Por exemplo, o relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais mostrou que estima-se que as atividades humanas tenham causado cerca de 1,0°C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais, com uma variação provável de 0,8°C a 1,2°C em 2007. O aquecimento global provavelmente atingirá 1,5°C entre 2030 e 2052, se continuar aumentando na taxa atual (Allen et al., 2018).

Diante dessas evidências, as mudanças climáticas globais têm sido cada vez mais reconhecidas como o principal desafio que a humanidade terá que enfrentar nas próximas décadas. Nesse contexto, é necessário avaliar as projeções climáticas de escalas climáticas globais e regionais e suas incertezas.

Nesta seção, são apresentadas e discutidas as projeções de mudanças de temperatura, precipitação e extremos climáticos geradas por Modelos Climáticos Regionais (RCMs), participantes do projeto CORDEX (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*; Giorgi et al., 2009), e forçados por Modelos Climáticos Globais (GCMs), participantes da Fase 5 do projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5) (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012), e que serviram de base para o Grupo de Trabalho I (GTI) do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (doravante referido pela sigla em inglês AR6) sobre as bases científicas da mudança do clima.

O CMIP5 e o CORDEX é um esforço de modelagem colaborativa que visa melhorar o conhecimento sobre mudanças climáticas. Mais detalhes sobre os modelos e simulações podem ser encontrados em Meehl et al. (2007) e os resultados estão disponíveis publicamente em *Earth System Grid Federation* website (ESGF, <http://www.earthsystemgrid.org>).

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dois cenários de forçamento, englobando trajetórias de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e mudanças no uso e ocupação do solo, denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs), foram considerados: RCP4.5 e RCP8.5 (Moss et al., 2010).

RCP4.5 é cenário em que a forçante radiativa se estabiliza em aproximadamente 4,5 W/m² e a concentração de CO₂ equivalente fica em torno de 650 ppm pouco depois de 2100. É considerado um cenário de estabilidade intermediária e com implementação de rigorosas políticas climáticas. RCP8.5 é um cenário em que a forçante radiativa é superior a 8,5 W/m² e a concentração de CO₂ equivalente é maior que 1.370 ppm em 2100. É considerado um cenário pessimista e sem implementação de políticas climáticas. As análises se concentram nas projeções climáticas para o período de 2041 a 2060 em relação a uma linha de base histórica de 1986 a 2005.

No mundo todo, muitas instituições desenvolveram modelos climáticos. As variações na configuração dos diferentes modelos causam diferenças nas simulações da variabilidade e das mudanças climáticas. Apesar disso, é fundamental destacar que os modelos climáticos são ferramentas importantes para a realização de estudos que nos levam a uma melhor compreensão do sistema climático e podem fornecer simulações e projeções úteis do clima futuro para diferentes regiões do mundo. A última geração de GCMs, como os modelos CMIP5, têm mostrado avanços significativos em termos de representação de processos (físicos e dinâmicos) e fenômenos críticos para estudos de mudanças climáticas globais e seus impactos, permitindo-nos ter mais confiança em as mudanças projetadas (Taylor et al., 2012).

Vários estudos avaliaram o desempenho do conjunto de modelos globais do CMIP5 na simulação da variabilidade climáticas em várias partes do mundo. Os resultados mostram que a grande maioria dos GCMs é capaz de reproduzir as características básicas do ciclo anual de precipitação, como a migração sazonal de convecção na região tropical e características climatológicas da monção global, em particular da América do Sul, embora alguns vieses sistemáticos permaneçam (Christensen et al., 2013). Os fatores que limitam a avaliação quantitativa da variabilidade da precipitação, principalmente em estudos regionais, incluem esquemas de parametrização da superfície, camada limite, microfísica e radiação utilizados pelos modelos (Yin et al., 2012). Isso também tem implicações para o uso dos resultados dos GCMs como *input* para modelos de impactos como os hidrológicos e agrícolas.

Para avaliações de mudanças climáticas em nível regional, há necessidade de informações em escala mais refinadas. Uma das formas de fazer isso é aumentando a resolução espacial do modelo climático na área de interesse. Nesse contexto, a aplicação de técnicas de downscaling é necessária para traduzir as informações fornecidas pelos GCMs

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

para uma grade de escala mais detalhada. A maior resolução espacial proporciona uma representação mais realística de características como a região costeira e as montanhas e de processos atmosféricos de menor escala. Portanto, espera-se que um modelo climático regional deva ser mais eficiente em representar o clima de um país específico do que um modelo global. Existem duas abordagens fundamentais. A primeira delas é uma abordagem dinâmica em que um modelo climático regional de maior resolução está “aninhado” no modelo climático global e recebe dados do GCM nas fronteiras do domínio regional. A segunda abordagem é usar métodos estatísticos para estabelecer relações empíricas entre as variáveis climáticas de resolução GCM e o clima local. Informações adicionais sobre essas abordagens podem ser encontradas em Fowler, Blenkinsop e Tebaldi (2007), Giorgi (2019) e Ashfaq et al. (2020).

A maioria das abordagens de downscaling dinâmico usa os mesmos esquemas de parametrização de convecção que seus GCMs pai e produz saídas de passo de tempo diárias. No entanto, recentemente, o desenvolvimento de simulações de modelo em escala convectiva (sigla em inglês CPMs, *Convection-Permitting Climate Modeling*) de altíssima resolução permitiu que os extremos de precipitação sub-diários e até sub-horários fossem bem representados em áreas de escala continental (Ban, Schmidli, & Schaer, 2014; Chan et al., 2016a, b; Kendon et al., 2014, 2019; Liu et al., 2017). Os CPMs resolvem explicitamente os processos dinâmicos da nuvem, fornecendo grandes melhorias em modelos climáticos de resolução mais grosseira com convecção profunda parametrizada na simulação de precipitação sub-diária, incluindo características de intensidade-frequência-duração (Ban et al., 2014; Gentry & Lackmann, 2010; Kendon et al., 2012; Prein et al., 2013) e precipitação extrema orograficamente melhorada (Bartsotas et al., 2017; Colle & Mass, 2000; Colle et al., 2005; Prein et al., 2013). É importante ressaltar que eles projetam maiores aumentos nos extremos de precipitação sub-diária com o aquecimento global do que os modelos parametrizados por convecção (Kendon et al., 2014), embora as mudanças projetadas para os extremos de precipitação em nível diário sejam razoavelmente robustas por meio de escalas espaciais de GCMs a CPMs (Kendon et al., 2019).

Especificamente no contexto de integração entre modelos climáticos e hidrológicos para geração de energia, há diversos estudos demonstrando a importância da previsão de precipitação na operação de reservatórios, como, por exemplo, (COLLISCHONN, TUCCI, et al., 2007), (COSSICH, CATALDI e FILHO, 2015), (BOU, DE SÁ e CATALDI, 2015), (FAN, COLLISCHONN, et al., 2016) e (DE PAIVA, MONTENEGRO e CATALDI, 2020).

Os resultados encontrados nesses trabalhos são consistentes e concordam que a consideração de cenários de precipitação, obtidos através de GCMs e RCMs associados aos modelos chuva-vazão, resulta em previsões de vazão mais adequadas, representando

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

ganhos à geração de cenários de afluências. Isto porque, a utilização de séries estatísticas nos modelos tradicionais do setor elétrico como o PREVIVAZ e GEVAZP não tem gerado previsões consistentes, mesmo para horizontes curtos. Isto é reflexo da presença de novas dinâmicas no comportamento do clima face a mudança do clima, o que leva a sérios questionamentos na premissa de estacionariedade das séries históricas de afluências.

No Brasil, as primeiras mobilizações em termos de estudos do clima futuro ocorreram em meados da década de 1990, através da criação da Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, tendo como objetivo coordenar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) e desenvolver a Primeira Comunicação Nacional.

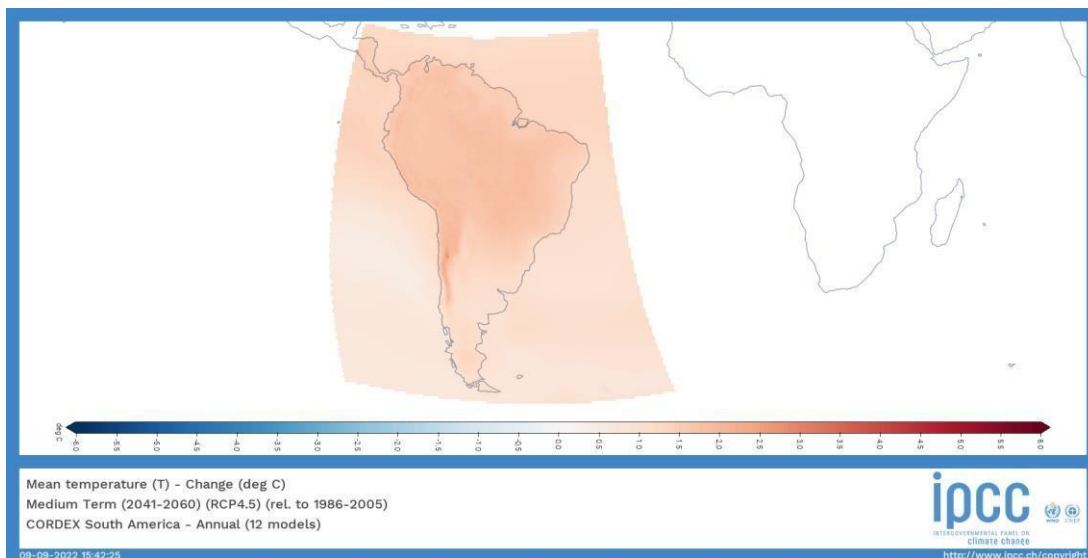
Após a 10^a Conferência das Partes à CQNUMC em 2004, foi assinado um novo acordo visando a Segunda Comunicação Nacional, no qual o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ficou responsável pela modelagem regional das projeções de mudanças climáticas considerando os cenários climáticos gerados pelos modelos globais do IPCC (PNUD, 2011).

A partir de então, diversos estudos e trabalhos foram publicados a fim de avaliar os impactos das mudanças climáticas na América do Sul, especialmente no Brasil ou em alguma de suas regiões, como, por exemplo, (MARENGO, CHOU, *et al.*, 2012); (KRÜGER, DA ROCHA, *et al.*, 2012); (LIMA, COLISCHONN e MARENGO, 2014); (CHOU, LYRA, *et al.*, 2014); (MARENGO e BERNASCONI, 2014); (REBOITA, ROCHA, *et al.*, 2014); (LYRA, CHOU e SAMPAIO, 2016); (LLOPART, REBOITA e DA ROCHA, 2019); (DA SILVA, ALVES e CATALDI, 2019) e (SILVA, SILVEIRA, *et al.*, 2020).

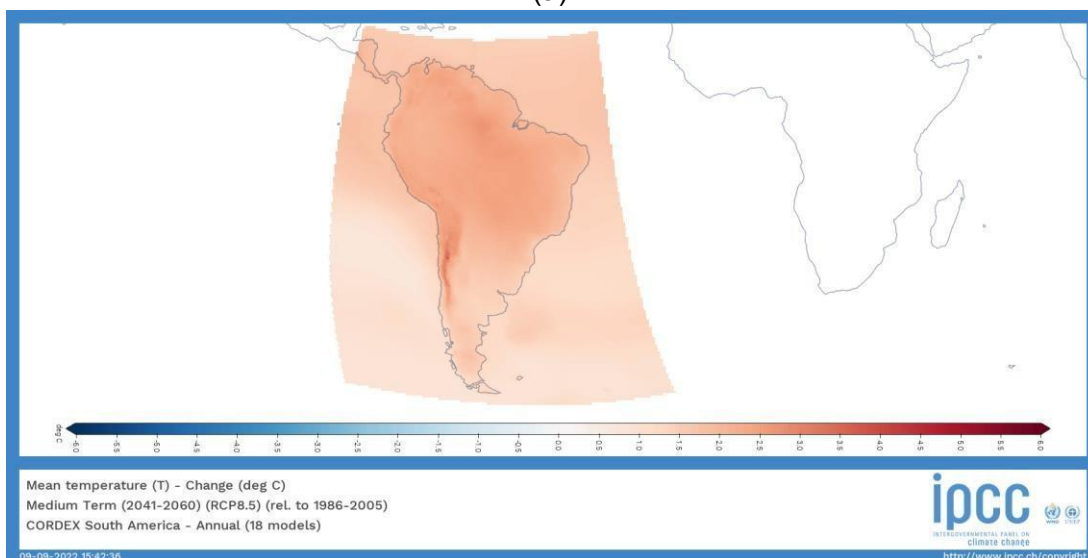
Uma forma de compreender os possíveis cenários climáticos futuros resultantes de diferentes modelos é analisando efetivamente um conjunto (*ensemble*) de modelos provenientes de diversos centros de pesquisa do mundo todo. Neste sentido, a seguir são apresentados resultados do conjunto de ao menos 12 modelos climáticos regionais participantes do projeto CORDEX executados de acordo com os RCPs 4.5 e 8.5. Por meio desta análise, é possível analisar a incerteza tanto na trajetória dos cenários de emissões dos gases de efeito estufa quanto como dos modelos.

A Figura 5 mostra as mudanças nas temperaturas da região da América do Sul projetadas para o século XXI pelos modelos climático regionais. Projeta-se um aumento em todas as regiões do Brasil e tornam-se maiores nos cenários de emissões mais altas (RCP8.5) do que nos cenários de emissões mais baixas (RCP4.5). A projeção de aquecimento para as regiões tropicais varia de 1,6 °C em 2041-2060 no cenário RCP4.5 (otimista) até 2,2 °C no cenário RCP8.5 (pessimista), com os maiores aumentos ocorrendo na Região Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



(a)



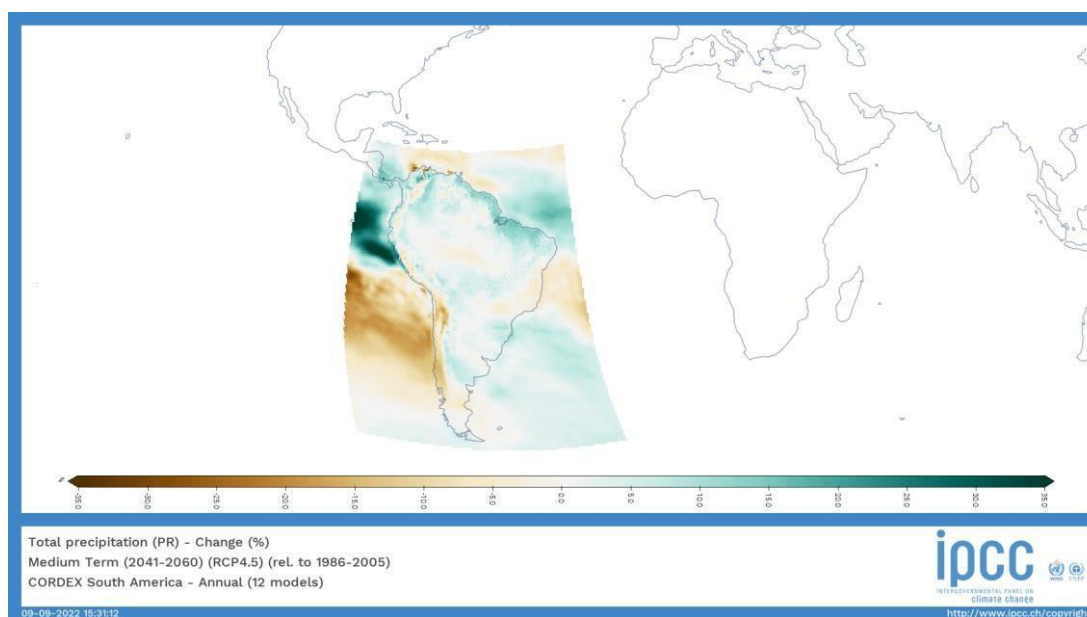
(b)

Figura 5 – Mudança anual da temperatura média (°C) projetada para o período 2041-2060, em relação à média histórica (1986-2005) a partir da média dos modelos climáticos regionais do CORDEX para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b). Fonte: Atlas IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

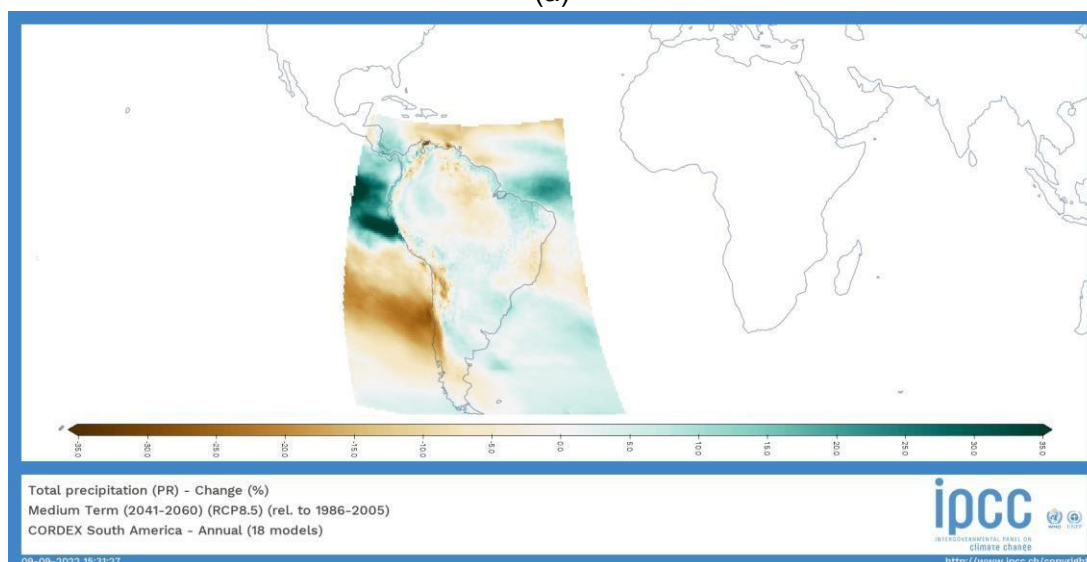
As mudanças na precipitação média anual projetada a partir do *ensemble* CORDEX para o final do meio do século 21 (2041-2060) são mostradas na Figura 6. Como visto anteriormente, a análise do *ensemble* mostra que as temperaturas médias são projetadas para aumentar substancialmente nas regiões do Brasil, entretanto, há uma resposta mais mista na precipitação (Figura 6). Os amplos padrões de mudança climática projetados pelo conjunto CORDEX para RCP4.5 são semelhantes aos de RCP8.5 e mostram que o sinal de mudança climática na precipitação aumenta em cenários de maior concentração. Nas regiões do Brasil, a projeção é de que, no futuro, certas áreas se tornarão mais úmidas e outras, mais

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

secas. Com relação a região sul da Amazônia, partes do Sudeste e nordeste do Brasil, as projeções são de grandes reduções percentuais nas precipitações pluviométricas e de elevação da temperatura do ar em ambos os cenários. Condições mais úmidas são projetadas para a região Sul e extremo norte da região Norte. No entanto, é importante destacar que há um grande grau de incerteza nessas projeções, como evidenciado pelos baixos níveis de concordância entre os RCMs e GCMs individuais no sinal da mudança para condições mais úmidas ou mais secas (Collins et al. , 2013).



(a)



(b)

Figura 6 – Mudança anual da precipitação (%) projetada para o período 2041-2060, em relação à média histórica (1986-2005) a partir da média dos modelos climáticos regionais do CORDEX para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b). Fonte: Atlas IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

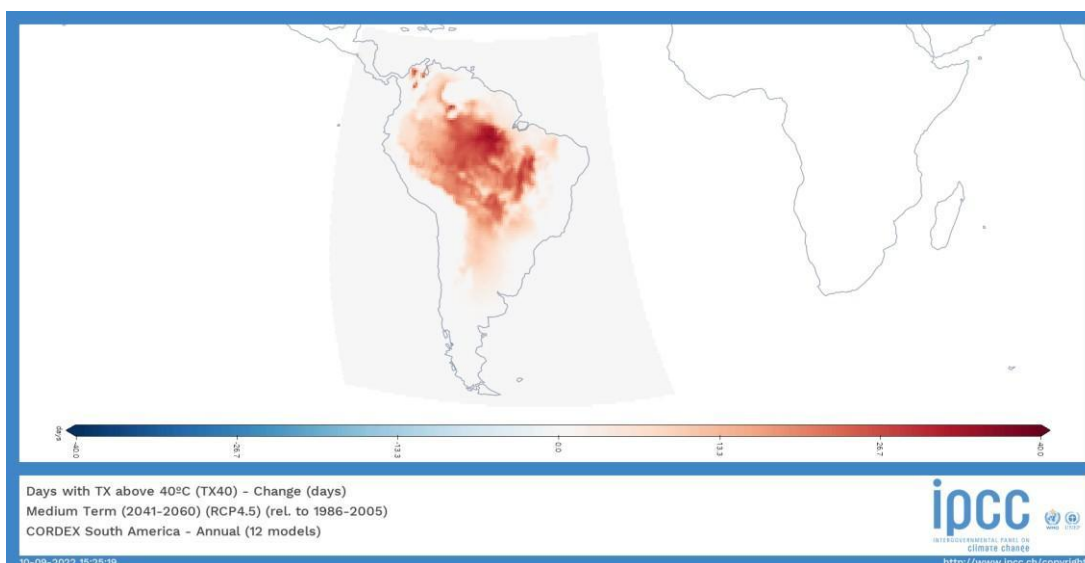
PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nas últimas décadas, diversos estudos têm demonstrado que muitas regiões do mundo são suscetíveis a eventos climáticos extremos devido aos seus potenciais impactos na sociedade e nos ecossistemas (IPCC 2022). A seguir, apresentamos uma análise dos extremos climáticos com base em índices calculados para o conjunto multi-modelo CORDEX.

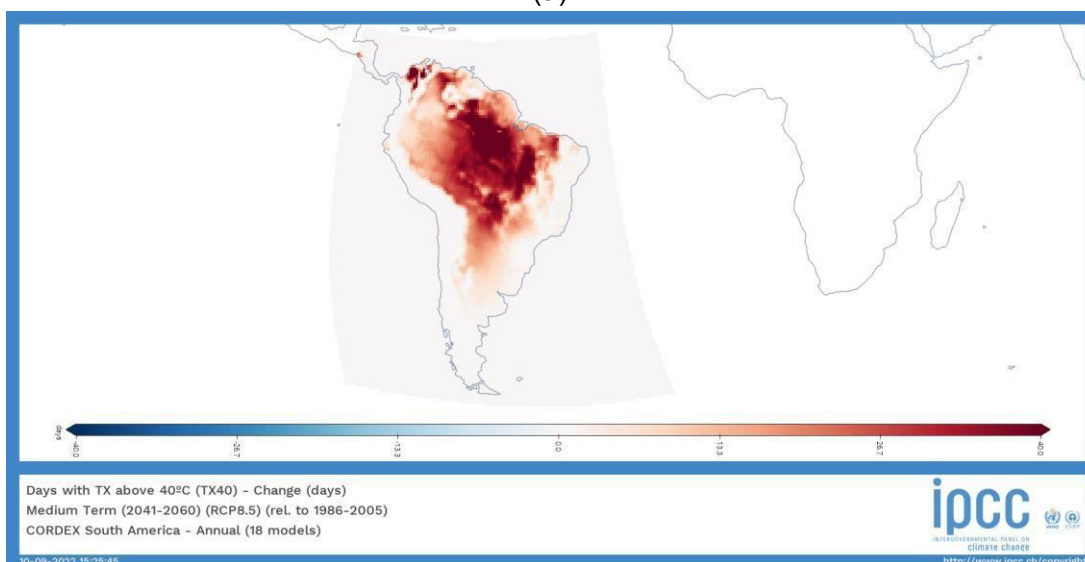
Aqui, consideramos três índices baseados em quantidades diárias de precipitação para apresentar uma visão geral das mudanças projetadas em eventos hidroclimáticos extremos e temperatura máxima diária para diferentes RCPs. Os índices selecionados são o índice de dias secos consecutivos (CDD), precipitação anual máxima em 5 dias consecutivos (RX5day) e número de dias com temperatura máxima maior que 40 °C (TX40). O índice CDD representa a duração do período mais prolongado de dias secos consecutivos (ou seja, dias com precipitação menor que 1 mm) em um ano que termina nesse ano e é muitas vezes referido como um indicador de seca. Informações detalhadas sobre os índices podem ser encontradas em Alexander et al. (2006) e Zhang et al. (2011) e no portal do Atlas Interativo do IPCC.

As alterações projetadas de TX40 projetadas pela média do conjunto CORDEX para RCP4.5 e 8.5 no meio do século 21 (2041-2060) são mostradas na Figura 7. As mudanças nos índices são exibidas em relação ao período de referência (1986 a 2005). A média dos modelos projeta uma tendência de aumento de TX40 da ordem de 12 dias no RCP4.5 e 22 dias no RCP8.5 em particular sobre as regiões norte e centro-oeste. Cabe ressaltar que a tendência de aumento das projeções para os índices de aumento das noites quentes (TN90p) é mais acentuado que a diminuição das noites frias (TN10p) (figuras não mostradas) destacando uma diminuição das amplitudes térmicas (diferença entre a temperatura máxima e mínima registradas em um período) durante os dias. As elevações de temperatura podem começar a ter impactos sobre diferentes aspectos das atividades e do bem-estar das pessoas em diferentes limiares, como saúde, infraestrutura e demanda de energia elétrica.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



(a)



(b)

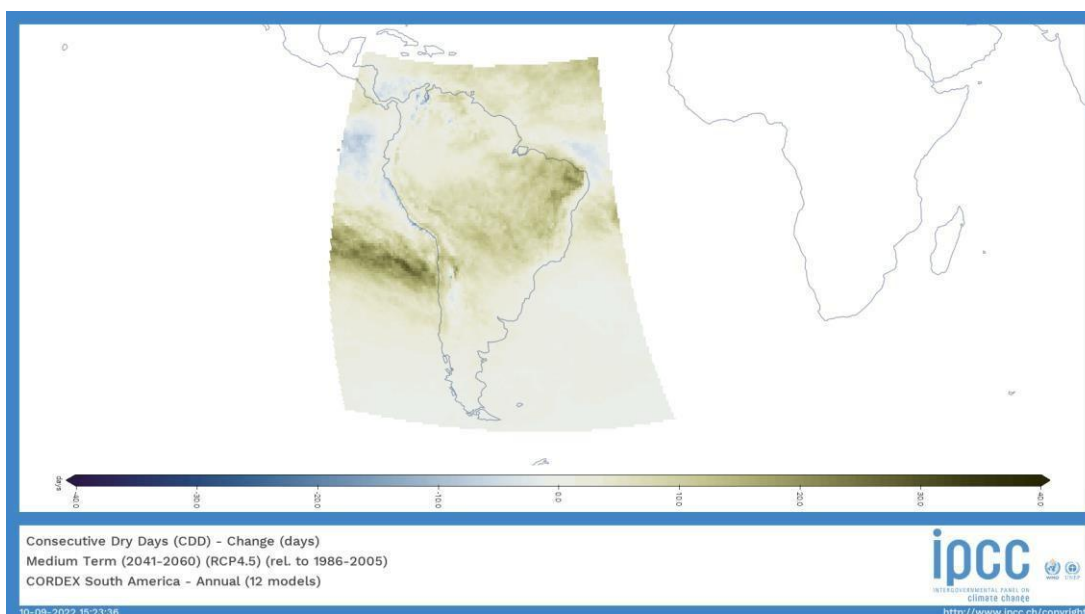
Figura 7 – Mudança no número de dias com temperatura média máxima maior que 40 °C projetada para o período 2041-2060, em relação à média histórica (1986-2005) a partir da média dos modelos climáticos regionais do CORDEX para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b). Fonte: Atlas IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

Globalmente, as projeções sugerem que muitas regiões do mundo experimentarão eventos de secas mais frequentes/severas e chuvas fortes como consequência do aumento das emissões de GEE. As tendências na precipitação média anual observada ao longo das últimas décadas são consistentes com as projeções climáticas para o século XXI com base no conjuntos de modelos do CORDEX e CMIP5 para ambos os cenários de emissão. Analisando os resultados apresentados nas Figura 8 e Figura 9 nota-se que as projeções indicam um aumento de aproximadamente 8% dos dias muito úmidos (RX5day) em todas as

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

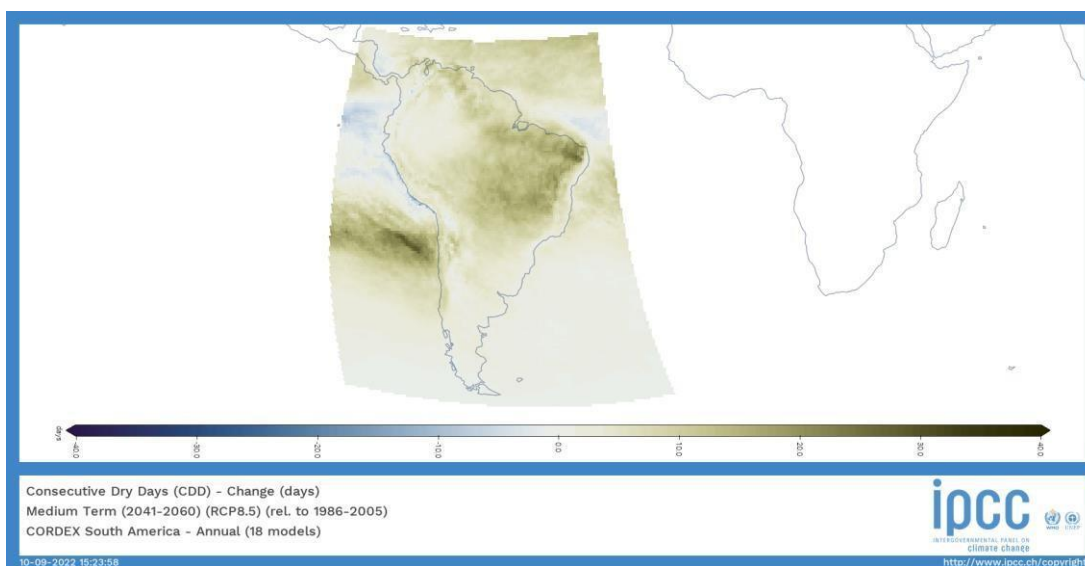
regiões do Brasil. Observa-se também que os dias muito úmidos aumentam mesmo nas regiões onde se prevê que os CDDs aumentem, como no Brasil central e nordeste do Brasil. Para o sul da Região Sudeste e a Região Sul do Brasil, a predominância de aumento no percentual de precipitação intensa é verificada na maioria dos modelos, indicando que essas regiões poderão apresentar um risco maior de ocorrência de enchentes, inundações e alagamentos.

Sob o cenário de emissões mais altas (RCP8.5) (Figura 8b), o número de dias secos consecutivos deverá aumentar na ordem de 8 dias em comparação com a linha de base em todas as regiões. Vale ressaltar que esse aumento de dias secos consecutivos (em conjunto com o aumento das temperaturas) tem o potencial de intensificar o risco de ocorrência de queimadas, bem como de mudar o comportamento espaço-temporal da precipitação, o que, consequentemente, aumenta a vulnerabilidade dos ecossistemas.



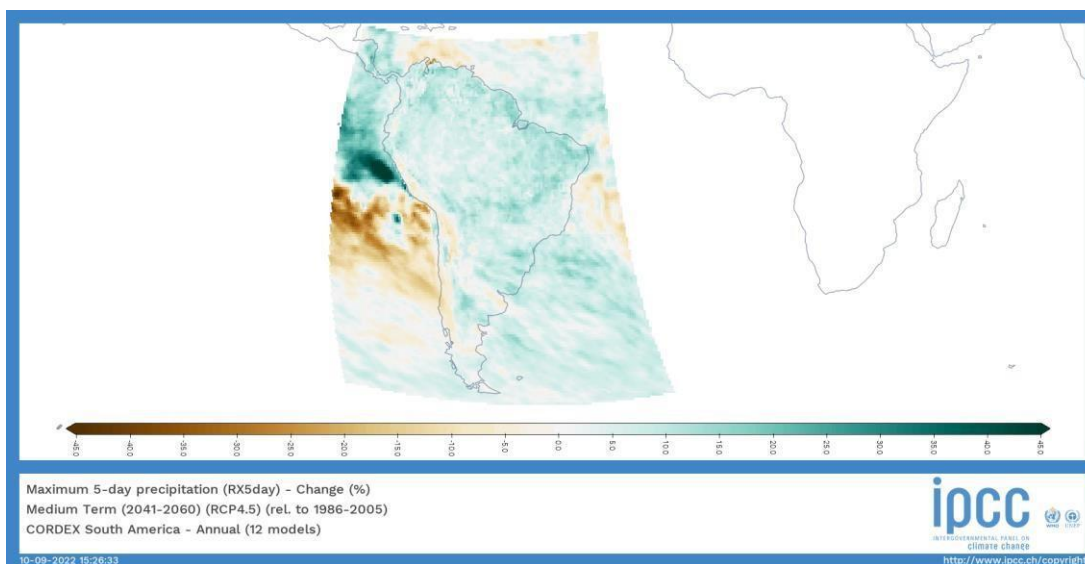
(a)

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



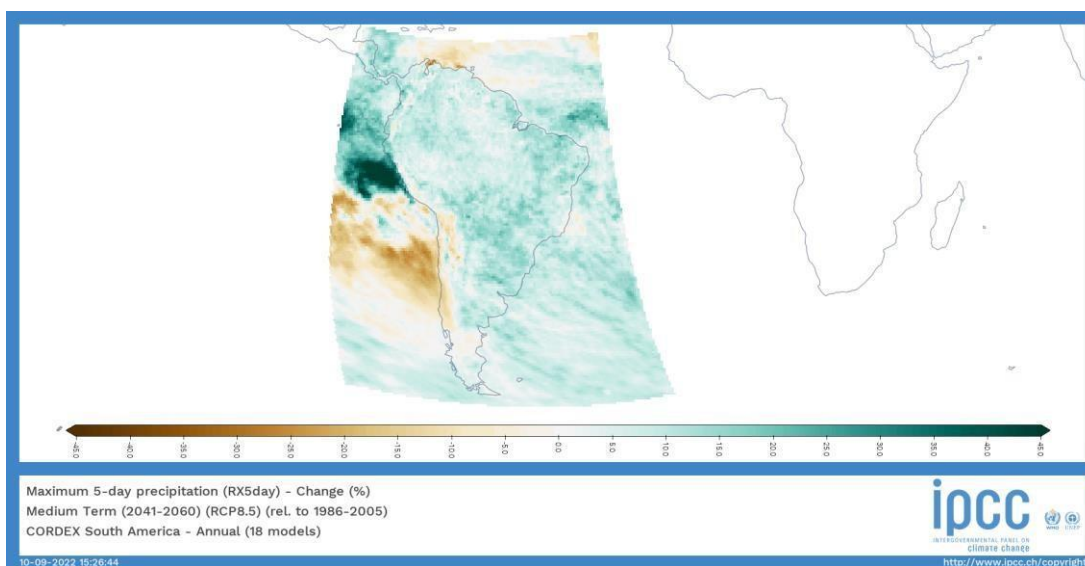
(b)

Figura 8 – Projeções da variação do número de dias secos consecutivos – CDD (dias) para o período 2041-2060 em relação ao período de referência (1986-2005) a partir da média dos modelos climáticos regionais do CORDEX para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b). Fonte: Atlas IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)



(a)

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS



(b)

Figura 9 – Projeções da variação da precipitação máxima acumulada em 5 dias – RX5day (%) para o período 2041-2060 em relação ao período de referência (1986-2005) a partir da média dos modelos climáticos regionais do CORDEX para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b). Fonte: Atlas IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

Diversos estudos já analisaram as tendências observadas e projetadas de indicadores climáticos sobre diferentes regiões do Brasil e América do Sul como um todo, utilizando modelos climáticos globais e regionais (Cavalcanti et al., 2015; Silva, 2016; Marengo et al., 2009, 2010, 2012; Rusticucci et al., 2012; Skansi et al., 2013).

A validação abrangente dos índices de extremos climáticos no CMIP5 sob as condições climáticas atuais e a análise de suas mudanças futuras projetadas simuladas pelos modelos CMIP5 foram realizadas por Sillmann, Kharin e Zhang (2013a) e Sillmann, Kharin e Zwiers (2013b) e estão disponíveis no arquivo de índices ETCCDI (EIA) em <http://www.cccma.ec.gc.ca/data/climdex/climdex.shtml>. Sillmann et al. (2013a,b) revelaram que as simulações de ensemble multi-modelo superaram os modelos individuais e, portanto, espera-se que forneçam estimativas mais robustas de mudanças futuras e incertezas relacionadas ao modelo.

4 ESTUDOS DOS IMPACTOS DO CLIMA NAS VAZÕES PARA AS PRINCIPAIS

BACIAS DO BRASIL

A geração hidrelétrica é responsável por ofertar a maior parte da eletricidade no Brasil. Tal como outras renováveis, a fonte hídrica tem alta sensibilidade a variáveis meteorológicas,

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

de maneira que mudanças climáticas podem impactá-la consideravelmente. A partir do AR4 (IPCC, 2007b), onde os modelos globais do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3* (CMIP3) foram utilizados, vários trabalhos foram produzidos de 2007 a 2014.

O primeiro trabalho que calculou o impacto na energia assegurada ou energia garantida do Setor Elétrico Brasileiro foi o do Projeto P&D Estratégico ANEEL 10 finalizado em 2013 (LIMA, COLISCHONN e MARENGO, 2014). Este trabalho utilizou o *Eta* com discretização de 40 km, aninhado ao modelo global *HadCM3*, baseado no fato de que este modelo representava bem as condições climáticas na América do Sul e que estava de acordo com os 17 dos 22 modelos usados no (IPCC, 2007b). Estes modelos eram consistentes em suas projeções de padrões de mudanças de precipitação: aumento nas chuvas na costa norte do Peru/Equador e no sudeste da América do Sul com reduções no leste da Amazônia, nordeste/costa da Venezuela e sul do Chile.

O trabalho de (VIOLA, MELLO, *et al.*, 2014) utilizou o mesmo modelo regional *Eta40* aninhado ao *HadCM3* para avaliar os impactos na Bacia do Rio Grande (região Sudeste do Brasil) no cenário A1B. Havia a preocupação de verificar o efeito das mudanças nas vazões e foi utilizado o modelo chuva-vazão da Universidade de Lavras, o *LASH*. Adotou-se o mesmo período histórico 1961-1990, usado em (LIMA, COLISCHONN e MARENGO, 2014), para comparar com o período futuro de 2011-2099. No primeiro período de 2011 a 2040, o modelo clima/chuva-vazão projetou uma redução nas vazões dos rios dessa bacia e uma estabilidade nos demais períodos. No que se refere à sazonalidade, foi observado que os períodos secos aumentaram e os períodos chuvosos diminuíram, afetando a regularização dos rios.

Diversos estudos sobre as projeções climáticas regionalizadas, aninhando modelos regionais às saídas dos modelos globais do CMIP5, foram feitos devido a um melhor detalhamento das condições atmosféricas locais. Para isso, os pesquisadores brasileiros normalmente empregam os modelos regionais *Eta* ou *RegCM*, usando métricas similares de análises dos resultados: cálculo de médias sazonais e de índices climáticos e análises de tendências ao longo do tempo.

(NETO, DA PAZ, *et al.*, 2016), a partir de outras variáveis (precipitação, umidade do solo e evapotranspiração), avaliaram, através do modelo *Eta* aninhado ao *MIROC5* e *HadGEM2-ES*, os resultados de vazões extremas (mínimas ou máximas) no Brasil até 2100, utilizando uma curva de permanência, cujas condições máximas foram representadas pela Q10 (valores de vazão com frequência inferior a 10%) e as condições mínimas, por Q95 (valores de vazão com frequência superior a 95%), como ilustra a Figura 10.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

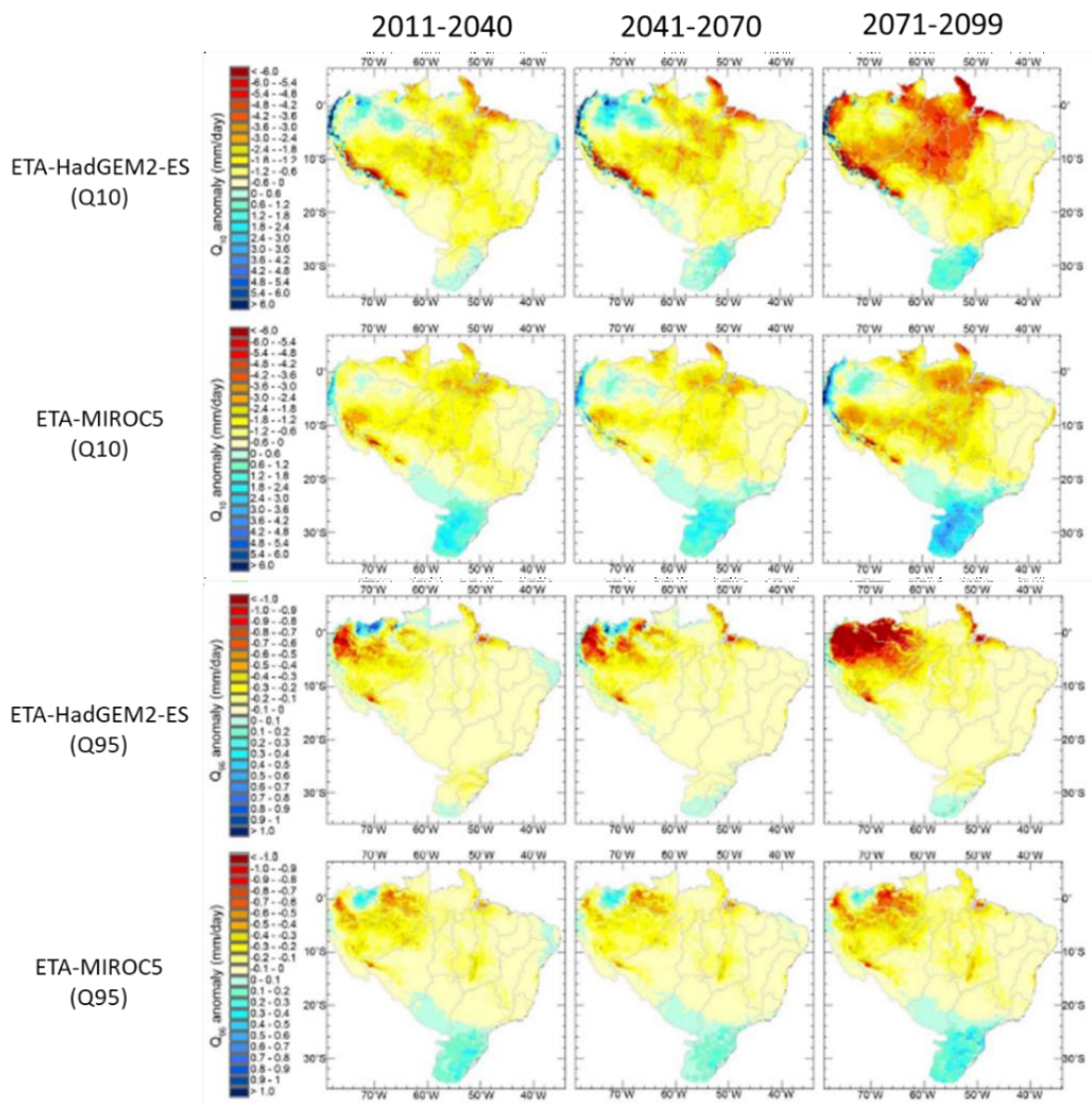


Figura 10 – Mudanças sazonais nas vazões Q10 e Q95 por modelo para o horizonte de análise 2011-2099 dividido em três períodos no cenário RCP8.5. Fonte: (NETO, DA PAZ, *et al.*, 2016)

Para alguns setores das regiões Sul e Centro-Oeste houve intensificação das vazões Q10, enquanto para o restante do país esse parâmetro apresentou tendências negativas, decrescendo até o final do século. Em relação à Q95, houve diferenças ligeiramente negativas que se intensificaram até o final do século. Destacam-se os indicativos de redução das vazões nas bacias do Tocantins e São Francisco e o aumento das vazões médias anuais nas bacias hidrográficas localizadas na região Sul do Brasil. Já para a bacia do Rio Paraná, os resultados divergiram, uma vez que o modelo *ETA-MIROC5* indicou aumento e o *ETA-HadGEM2-ES*, a redução das vazões.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Outro estudo relacionado aos eventos de vazões extremas foi realizado por (SILVEIRA, FILHO, *et al.*, 2018), utilizando as projeções de seis modelos do IPCC AR5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Observaram-se diferentes impactos nas afluências de acordo com as regiões brasileiras: na região Sul, todos os modelos indicaram aumento das vazões enquanto na região Norte a sinalização foi de redução; para o Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste, os modelos divergiram em relação ao impacto das mudanças climáticas nas vazões, porém com maior probabilidade de redução.

Esses resultados encontrados por (NETO, DA PAZ, *et al.*, 2016) e (SILVEIRA, FILHO, *et al.*, 2018) coincidem com as análises realizadas por (LIMA, COLISCHONN e MARENGO, 2014). Esses autores, empregando projeções climáticas advindas de 10 MCGs para simulação hidrológica das vazões das principais usinas hidrelétricas do Brasil a partir do modelo *MGB-IPH*, observaram uma redução das vazões das usinas localizadas nas regiões Norte e Nordeste, enquanto para as usinas situadas no Sul e parte do Sudeste, incluindo a bacia do Paraná, a tendência foi de aumento das vazões.

O estudo de VASQUEZ-ARROYO *et al.* (2020) utiliza os cenários de níveis específicos de aquecimento médio global de 2 ° C e 4 ° C, provenientes dos modelos climáticos regionalizados Eta_HadGEM2-ES e Eta_MIROC5. Os resultados indicam que a adaptação do sistema elétrico ante a redução da disponibilidade hídrica inclui maior penetração de outras fontes renováveis e termelétricas a gás natural, gerando um aumento no custo marginal do sistema para atendimento da demanda em 2030. Quanto às emissões de gases de efeito estufa, projeta-se um aumento nos cenários de níveis de aquecimento de 2°C, mas uma redução nos cenários em que o aquecimento atinge 4°C.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pesquisas sobre extremos e eventos críticos revelam sinais muito claros dos efeitos das mudanças climáticas induzidas pelo homem nas mudanças nos extremos de tempo e clima, (IPCC 2021, 2022). Extremos mais frequentes e intensos já estão sendo observados em todas as regiões do mundo. Projeta-se que muitas regiões experimentarão um aumento na probabilidade de eventos simultâneos com maior aquecimento global (alta confiança). Em particular, ondas de calor e secas simultâneas tendem a se tornar mais frequentes, e isso aumenta o risco de secas e crises hídricas e incêndios florestais, afetando segurança hídrica, alimentar, energia, saúde, social. Além dos impactos decorrentes desses eventos, esse aumento intensifica as desigualdades internas e externas dos países mais afetados.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Com um aumento na intensidade e frequência de extremos do tempo e clima, é preciso de uma conscientização sobre os riscos de desastres de origem hidro-geo-meteorológico assim como de fogo, e as ações para reduzi-los aumentaram globalmente, mas medidas de adaptação têm sido insuficientes diante da magnitude do problema. A implementação de medidas de adaptação, contudo, ainda é insuficiente diante da magnitude dos impactos das mudanças climáticas que já têm sido observados em todas as regiões habitáveis do planeta e que podem se agravar em um cenário de aquecimento global acima de 1,5 °C dos níveis pré-industriais. Atualmente o aquecimento global já observado desde 1850 varia entre 1,1-1,2 °C, e o extremos climáticos e subsequentes desastres já observados nas últimas décadas no Brasil e no mundo estão levando aos governos nacionais e locais, bem como as empresas e a sociedade civil, a reconhecer a crescente necessidade de adaptação às mudanças climáticas.

A mudança do clima é apenas um dos muitos processos que influenciam os riscos de desastres. A Quarta Comunicação Nacional Brasil a UNFCCC 4CN analisou fatores de risco de desastres considerando os impactos atuais e futuros relacionados ao clima (variabilidade climática e mudança do clima), fatores socioeconômicos e outras pressões não climáticas que poderiam ampliar a vulnerabilidade e/ou a exposição à variabilidade e à mudança do clima. Segundo a 4CN, uma das principais consequências das mudanças climáticas no Brasil é o aumento dos extremos de chuva, que causa desastres hidrometeorológicos. A dimensão continental brasileira, as características regionais dos biomas e a desigualdade socioeconômica são fatores condicionantes dos impactos dos eventos extremos no País.

A 4CN aponta que as mudanças climáticas impactam diferentemente as grandes regiões brasileiras, em função da densidade populacional e da baixa qualidade dos serviços de infraestrutura urbana. As chuvas extremas de média intensidade e longa duração encharcam o solo; e a subsequente ocorrência de chuvas de curta duração e alta intensidade, com o solo já encharcado, causa os deslizamentos, afetando também a saúde da população, pois causam óbitos, deixam pessoas feridas, desabrigadas, e aumentam o risco de contaminação por doenças de veiculação hídrica. As projeções mostram para meados e finais do Século 21 aumentos nas chuvas na região Sul, Sudeste, Noroeste da Amazônia e leste do Nordeste, na forma de eventos de chuva intensa, assim como uma tendência de redução de chuvas no leste da Amazônia, sul da Amazônia e no semiárido do Nordeste, aumentando o risco de secas e afetando seguranças hídrica, alimentar e em energética em todo o país (Perez et al., 2020).

Num cenário com aquecimento global maior de 1.5-2.0 °C, a ação humana está criando riscos maiores e mais perigosos e empurrando o planeta para os limites existenciais e ecossistêmicos. As atividades humanas associadas a desmatamento e aumento na emissão

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

de gases de efeito estufa podem levar a níveis de aquecimento maiores de 2 °C a meados do Século 21. A Figura 11 mostra os cenários futuros de clima para vários níveis de aquecimento global (1,5 °C, 2,0 °C e 4,0 °C), produzidos pelo Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas IPCC – AR6. Os resultados mostram que regiões como a Bacia do Paraná-Prata poderiam no futuro experimentar maiores volumes de chuva. Eventos de chuva intensa concentrados em poucos dias separados por períodos secos podem deflagrar desastres hidro-geo-meteorológicos que em áreas vulneráveis e expostas podem afetar a população. Na Amazônia do leste, Pantanal e Nordeste a possibilidade de períodos de estiagem mais longos e secas podem afetar a segurança hídrica energética e alimentar e elevar o risco de incêndios. Na Amazônia do norte os excessos projetados de chuva podem gerar inundações mais intensas, como a ocorrida em junho de 2021 do Rio Negro em Manaus, que chegou a 30.09 m, o maior valor em 103 anos de registro. As mudanças nos extremos tendem a ser maiores se o aquecimento global ultrapassa os 2 °C.

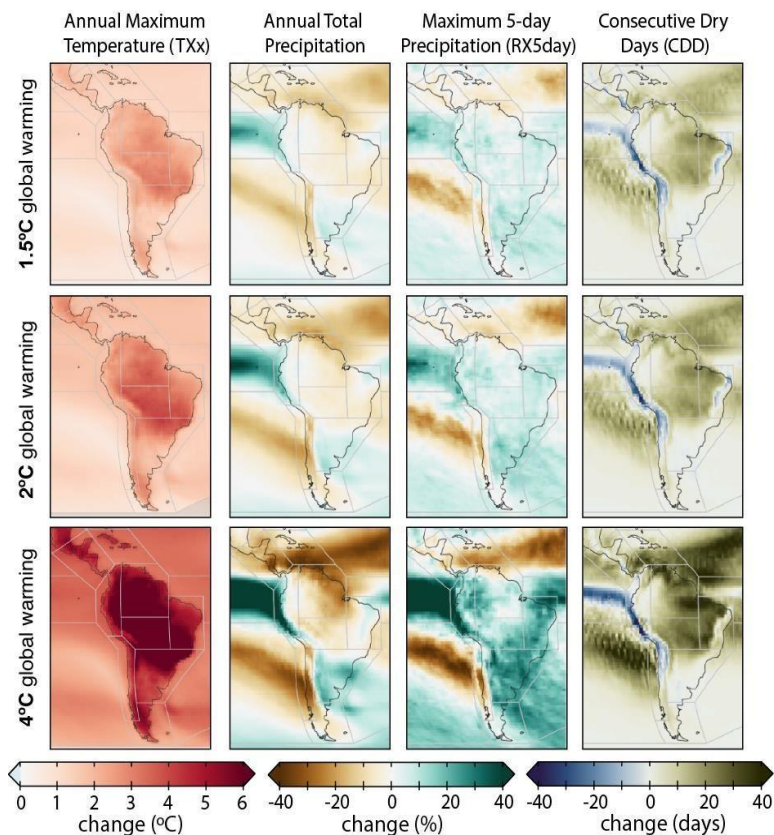


Figura 11 – Mudanças projetadas na temperatura máxima anual (TXx), precipitação total anual (Pr), Precipitação máxima em 5 dias (RX5day) e dias consecutivos secos (CDD) para diferentes níveis de aquecimento global 1,5 °C, 2 °C e 4 °C em relação ao período pré-industrial (1850-1900). Fonte: IPCC 2021

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Projeções indicam que as tendências de aumento de temperatura observadas no país devem continuar ao longo do século 21 a uma taxa superior à média global. Diante de uma trajetória de alta emissão de GEE, projeta-se que a maioria das regiões brasileiras experimentarão um aumento de pelo menos 4 °C nas temperaturas médias. Projeções de mudança nos valores médios de precipitação, nas características das estações chuvosas e na frequência e intensidade de eventos extremos ao longo do século 21. Projeta-se diminuição na precipitação média nas regiões Nordeste, Norte e região central do país e aumento principalmente na região Sul. Espera-se aumento de extremos de seca com ênfase

Na região Nordeste e Norte, e conforme o cenário, sobre as regiões Centro-Oeste e Sudeste, principalmente no verão (época de maiores acumulados de precipitação). As projeções indicam também aumento significativo dos extremos de precipitação em grande parte do território, com maior concordância dos modelos para as regiões Sul e Sudeste, e em outras regiões conforme o cenário, como o noroeste da Amazônia.

Reboita et al., (2022) através de uma análise de multi-modelo regionais (Eta, RegCM e REMO) participantes do projeto CORDEX-CORE para a América do Sul sumariza as mudanças projetadas precipitação no período 2080-2099 descrita por seis índices climáticos utilizados pelo IPCC (2021) baseadas no RCP8.5 e para o período mais úmido da maior parte da América do Sul (dezembro-janeiro-fevereiro) (Figura 12). O sinal de mudança mais consistente está localizado onde mais de um índice climático indica mudanças, e ocorre em uma grande área da Amazônia e norte da América do Sul, e a bacia do Prata.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

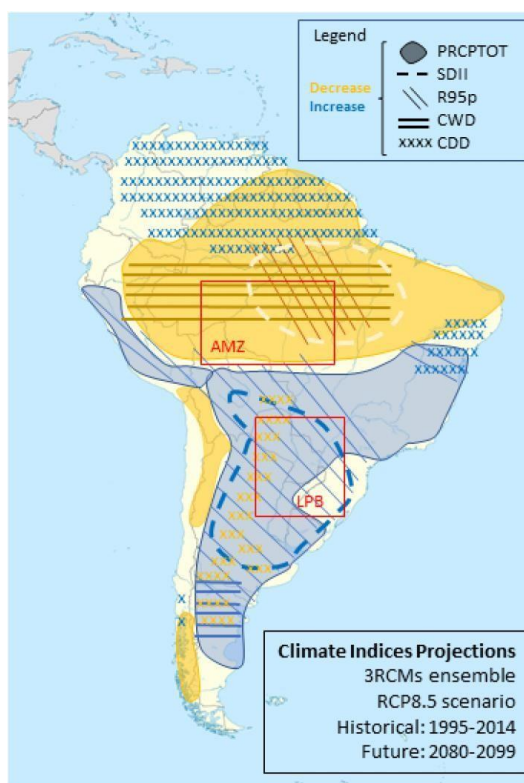


Figura 12 – Representação esquemática das mudanças projetadas para os índices climáticos de precipitação baseado no conjunto 3 RCMs sob RCP8.5 no final do século (2080-2099). As caixas vermelhas indicam a localização dos subdomínios nas bacias do Amazonas e do Prata (Reboita et al., 2022).

Em relação ao uso de fontes renováveis de energia, estas são diretamente impactadas por variáveis climáticas. Isso faz com que sua oferta seja mais vulnerável a mudanças climáticas que a de recursos fósseis (LUCENA et al., 2009; SCHAEFFER et al., 2012). Além do impacto quantitativo na geração e do aumento do risco de déficit no suprimento de energia, alterações no aproveitamento das fontes renováveis por causa das mudanças climáticas podem impactar a caracterização da matriz elétrica, originando um balanço de energia diferente do anteriormente projetado (QUEIROZ et al., 2016). No SIN, a diversidade da matriz elétrica possibilita a compensação de impactos climáticos na geração elétrica entre diferentes fontes energéticas, como entre as renováveis e as termelétricas a combustíveis fósseis e mesmo entre fontes renováveis. Essa compensação dota o sistema elétrico de uma capacidade intrínseca de adaptação, a assim chamada Capacidade Adaptativa (BRASIL, 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111(D5), D05109. Available from <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>.
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Arago'n-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2018). Framing and Context. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pean, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*.
- Ashfaq, M., Cavazos, T., Reboita, M. S., Torres-Alavez, J. A., Im, E.-S., Olusegun, C. F., Alves, L., Key, K., Adeniyi, M. O., Tall, M., Sylla, M. B., Mehmood, S., Zafar, Q., Das, S., Diallo, I., Coppola, E., & Giorgi, F. (2020). Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations. *Climate Dynamics*. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05306-2>.
- Alvalá RC et al (2017) Drought monitoring in the Brazilian semiarid region, in press, *Anais da Academia Brasileira de Ciências do Brasil*. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- Ban, N., Schmidli, J., & Schaer, C. (2014). Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 7889_7907. Available from <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>.
- Bartsotas, N. S., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Solomos, S., & Kallos, G. (2017). Moving toward subkilometer modeling grid spacings: Impacts on atmospheric and hydrological simulations of extreme flash flood-inducing storms. *Journal of Hydrometeorology*, 18 (1), 209_226. Available from <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0092.1>.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. In: *Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. v. II, Brasília, 2016*.
- Cavalcanti, I.F.A., A.F. Carril, O.C. Penalba, et al. 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin—review and new results from observations and climate simulations. *J. Hydrol.* 523: 211–230.
- Colle, B. A., Garvert, M. F., Wolfe, J. B., Mass, C. F., & Woods, C. P. (2005). The 13_14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part III: Simulated microphysical budgets and sensitivity studies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(10), 3535_3558. Available from <https://doi.org/10.1175/JAS3552.1>.
- Colle, B. A., & Mass, C. F. (2000). The 5_9 February 1996 flooding event over the Pacific Northwest: Sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts. *Monthly Weather Review*, 128(3), 593_617. Available from [http://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000](http://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T. G., Krinner, M. S., Tebaldi, C., Weaver, A. J., & Wehner, M. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In T. F. Stocker, G.-

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

K. D. Qin, M. T. Plattner, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1029_1136). Cambridge: Cambridge University Press.

Chan, S. C., Steven, C., Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., & Blenkinsop, S. (2016a). Downturn in scaling of UK extreme rainfall with temperature for future hottest days. *Nature Geoscience*, 9(1), 24_28. Available from <https://doi.org/10.1038/ngeo2596>.

Chan, S. C., Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., & Blenkinsop, S. (2016b). The characteristics of summer sub-hourly rainfall over the southern UK in a high-resolution convective permitting model. *Environmental Research Letters*, 11(9), 94024.

Christensen, J. H., Kanikicharla, K. K., Aldrian, E., An, S., Il., Albuquerque Cavalcanti, I. F., de Castro, M., Dong, W., Goswami, P., Hall, A., Kanyanga, J. K., Kitoh, A., Kossin, J., Lau, N. C.,

Renwick, J., Stephenson, D. B., Xie, S. P., Zhou, T., Abraham, L., Ambrizzi, T., ... Zou, L. (2013). Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In *Intergovernmental panel on climate change (Ed.), Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (Vol. 9781107057, pp. 1217_1308). Cambridge: Cambridge University Press. Available from <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.028>.

Cuartas, L.A.; Cunha, A.P.M.d.A.; Alves, J.A.; Parra, L.M.P.; Deusdará-Leal, K.; Costa, L.C.O.; Molina, R.D.; Amore, D.; Broedel, E.; Seluchi, M.E.; et al. Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water* 2022, 14, 601. <https://doi.org/10.3390/w14040601>

Cunha APMA, Zeri M, Deusdará Leal K, Costa L, Cuartas LA, Marengo JA, Tomasella J, Vieira RM, Barbosa AA, Cunningham C, Cal Garcia JV, Broedel E, Alvalá R, Ribeiro-Neto G (2019) Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere* 10:642–649

Deusdará-Leal, K.; Mohor, G.S.; Cuartas, L.A.; Seluchi, M.E.; Marengo, J.A.; Zhang, R.; Broedel, E.; de Jesus Amore, D.; Alvalá, R.C.S.; Cunha, A.P.M.A.; et al (2022). Trends and Climate Elasticity of Streamflow in South-Eastern Brazil Basins. *Water* 2022, 14, 2245. <https://doi.org/10.3390/w14142245>

Espinoza, J.-C.; Marengo, J. A.; Schongart, J. et al. The New Historical Flood of 2021 in the Amazon River Compared to Major Floods of the 21st Century: Atmospheric Features in the Context of the Intensification of Floods. *Weather and Climate Extremes* 2022, 35. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>.

Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547_1578. Available from <https://doi.org/10.1002/joc.1556>.

Gentry, M. S., & Lackmann, G. M. (2010). Sensitivity of simulated tropical cyclone structure and intensity to horizontal resolution. *Monthly Weather Review*, 138(3), 688_704. Available from <https://doi.org/10.1175/2009MWR2976.1>.

Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Available from <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>, p. 2018JD030094.

Giorgi F, Jones C, Asrar G (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull* 175–183

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría,

M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.]. Cambridge University Press. In Press.

Jimenez JHC et al (2019) The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region, *Int J Climatol*. 2019;1–20.

Kendon, E. J., Roberts, N. M., Senior, C. A., & Roberts, M. J. (2012). Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model. *Journal of Climate*, 25(17), 5791–5806. Available from <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00562.1>.

Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., & Senior, C. A. (2014). Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change*, 4(7), 570–576. Available from <https://doi.org/10.1038/nclimate2258>.

Kendon, E. J., Stratton, R. A., Tucker, S., Marsham, J. H., Berthou, S., Rowell, D. P., & Senior, C. A. (2019). Enhanced future changes in wet and dry extremes over Africa at convection-permitting scale. *Nature Communications*, 10(1), 1794. Available from <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09776-9>.

Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., Barlage, M., Newman, A. J., Prein, A. F., Chen, F., Chen, L., Clark, M., Dai, A., Dudhia, J., Eidhammer, T., Gochis, D., Gutmann, E., Kurkute, S., Li, Y., Thompson, G., & Yates, D. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Climate Dynamics*, 49(1_2), 71–95. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3327-9>.

LUCENA, A. F. P. et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 879–889, 2009.

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

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta Cptec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 1829–1848, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late XXI Century: intercomparison of scenarios from three regional climate models (2009) *Climate Dynamics*. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-009-0721-6, v. 10.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014–2015 em São Paulo. *Revista USP*. São Paulo, n. 106, p. 31–44 julho/agosto/setembro 2015.

Marengo JA, Alves LM, Alvala RCS et al (2017) Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *An Acad Bras Cienc*. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

Marengo, J.A.; Cunha, A. P.; Cuartas, L. A. et al. (2021) Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Front. Water* 2021, 3, 639204. doi: 10.3389/frwa.2021.639204.

Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J., Zhao, Z. C., & IPCC. (2007) Global climate projections, In *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

work- ing group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, In *Nature* (Vol. 446). Available from <https://doi.org/10.1038/446727a>.

Modarres, R., 2007: Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21: 223–233. DOI: 10.1007/s00477-006-0058-1.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747_756. Available from <https://doi.org/10.1038/nature08823>.

Naumann, G.; Podestá., G.; Marengo, J. et al. El Episodio de Sequía Extrema de 2019–2021 en la Cuenca del Plata, EUR 30833 ES, Oficina de Publicaciones de la Uni.n Europea: Luxemburgo, 2022, doi:10.2760/346183.

Oliveira M.J., Carneiro C.D.R., Vecchia F.A.S., Baptista G.M.M. 2017. Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. *Terræ Didática*, 13(3):149-184. <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>

Perez L, et al (2020) Climate change and disasters: analysis of the Brazilian regional inequality/Mudanças climáticas e desastres: análise da desigualdade regional brasileira, *Sustainability in Debate - Brasília*, v. 11, n.3, p. 260-277, dez/2020

Prein, A. F., Gobiet, A., Suklitsch, M., Truhetz, H., Awan, N. K., Keuler, K., & Georgievski, G. (2013). Added value of convection permitting seasonal simulations. *Climate Dynamics*, 41 (9_10), 2655_2677. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1744-6>.

QUEIROZ, A. R. et al. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. *Renewable Energy*, v. 99, p. 379-389, 2016.

Reboita, M.S.; da Rocha, R.P.; Souza, C.A.d.; Baldoni, T.C.; Silva, P.L.L.d.S.; Ferreira, G.W.S. Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. *Atmosphere* 2022, 13, 1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>

Ranz, Ubel, Arkus, & Ottek (2010). Observed and projected climate shifts 1901 – 2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification.

Rusticucci, M. 2012. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmos. Res.* 106: 1–17.

Santos, D. J. dos, Pedra, G. U., Silva, M. G. B. da, Guimarães Júnior, C. A. ., Alves, L. M., Sampaio, G., & Marengo, J. A. (2020). Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C. *Sustainability in Debate*, 11(3), 57–90. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933>

SCHAEFFER, R. et al. Energy sector vulnerability to climate change: a review. *Energy*, v. 38, n. 1, p. 1-12, 2012.

Silva, M.E.S., G. Pereira & R.P. da Rocha. 2016. Local and remote climatic impacts due to land use degradation in the Amazon “Arco f Deforestation”. *Theor. Appl. Climatol.* 125: 609–623.

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013a). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1716_1733. Available from <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>.

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013b). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6), 2473_2493. Available from <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>.

PANORAMA ENERGÉTICO DEVIDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

SKANSI MM ET AL. 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Glob Planet Change* 100:295-307.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485_498. Available from <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Telesca, L., M. Lovallo, I. Lopez-Moreno and S. Vicente-Serrano, 2012: Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index time series in the Ebro Basin (Spain). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4): 1662–1678. DOI: 10.1016/j.physa.2011.10.023.

Vasquez-Arroyo, E, Gandelman DA, da Silva F, Magalar L, Santos DV, Lucena AFP (2020) Implications of climate change impacts for the Brazilian electricity mix / Implicações dos impactos das mudanças climáticas na matriz elétrica brasileira, *Sustainability in Debate - Brasília*, v. 11, n.3, p. 5-7, dez/2020

Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E., & Dickinson, R. E. (2012). How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? *Climate Dynamics*, 41 (11), 3127_3143. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y>.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851_870. Available from <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.