

Brasília, 3 de dezembro de 2021.

Ao Superintendente de Planejamento de Recursos Hídricos  
**Assunto: Impacto das Mudanças Climáticas na Demanda da Irrigação do Brasil**  
Referência: 02501.004649/2021-17

## I. INTRODUÇÃO

1. Garantir a segurança hídrica, missão da ANA, requer informações precisas e atualizadas sobre a dinâmica atual e as perspectivas de crescimento do consumo de água. Nos últimos anos, a Agência empreendeu esforço relevante na melhoria das estimativas de usos consuntivos no Brasil, em especial com a consolidação e uniformização de bases de dados e metodologias.
2. No início de 2019, houve a publicação do Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil e a consolidação da Base Nacional de Referência de Usos Consuntivos da Água. Desde então, essa fonte tem sido adotada pela Agência no cálculo do balanço hídrico nacional e em estudos de planejamento como os Relatórios e Informes de Conjuntura dos Recursos Hídricos, o Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH, os Planos Interestaduais de Recursos Hídricos e o Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH 2022-2040.
3. Nas últimas décadas, as mudanças climáticas tornaram-se um tópico de grande visibilidade pública e passaram a ocupar um espaço considerável nas agendas ambientais, políticas e sociais em todo o mundo. A maior expressão desse crescimento e articulação foi a formação, em 1988, do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).
4. Os sucessivos relatórios produzidos por esse painel têm reafirmado o aumento da temperatura global devido às emissões antropogênicas de carbono e alertado para os riscos dessa mudança. Também a partir dos resultados preocupantes constantes nesses relatórios, as nações têm buscado realizar negociações e acordos, como as da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que orientam principalmente os gastos públicos e as tomadas de decisão nos mais diferentes setores das sociedades.
5. De acordo com o IPCC (2013), mudanças climáticas são as variações significativas no estado médio do clima ou em sua variabilidade, persistindo por um período extenso. Essas mudanças climáticas podem acontecer devido a processos naturais (internos ou externos), por processos antropogênicos (mudanças causadas pelo ser humano), ou até mesmo pelo efeito somado de ambos os processos.
6. O IPCC e a Organização para Alimentos e Agricultura (FAO) das Nações Unidas (ONU) listaram a agricultura como um dos setores da sociedade mais vulneráveis às mudanças climáticas, principalmente nos países em desenvolvimento. A agricultura é uma atividade

altamente dependente de fatores climáticos, e quando esses passam por um processo de mudança, o impacto na produção agrícola pode se dar de diferentes formas como: mudança na severidade de eventos extremos, no número de graus-dia de crescimento devido as alterações na temperatura do ar, modificação na ocorrência e na severidade de pragas e doenças, mudanças no calendário de colheita/plantio, dentre outros.

7. A agricultura irrigada é duplamente impactada pelas mudanças climáticas: em áreas já instaladas, as alterações na quantidade e distribuição da precipitação tende a aumentar a necessidade de captação de água e potencializar conflitos; ao mesmo tempo, a irrigação é uma medida mitigadora das mudanças, sendo uma estratégia eficiente e secular utilizada para se adaptar às condições adversas do clima, além de ainda ser um dos meios mais importantes para garantir a produção de alimentos no mundo.

8. Ou seja, mudanças do clima têm potencial de estimular o aumento da demanda hídrica, tanto pelo aumento da necessidade de água em áreas atuais quanto pela intensificação da conversão de áreas de sequeiro em irrigadas na busca de segurança produtiva, o que se agravará se essas mesmas mudanças reduzirem a quantidade de água nos mananciais e incrementarem o uso de outras atividades econômicas.

9. O aquecimento global afeta as demandas de irrigação por meio de aumentos nas necessidades de evapotranspiração, mudanças nos padrões pluviométricos, problemas fitossanitários e na alteração do calendário agrícola a partir da antecipação ou atraso do plantio e da colheita, por exemplo. Essas mudanças no calendário se devem principalmente a eventuais alterações na sazonalidade tanto da evapotranspiração quanto da precipitação. Todas essas mudanças implicam em impactos no zoneamento agrícola hoje conhecido no Brasil, que potencialmente modifica os riscos climáticos envolvidos na condução das lavouras, que podem ocasionar perdas na produção agrícola.

10. Adicionalmente, como a agricultura irrigada influencia diretamente na disponibilidade hídrica numa bacia hidrográfica, especialmente onde essa atividade é intensiva, um eventual aumento na demanda hídrica da irrigação pode criar ou aumentar os conflitos com outros usuários dos recursos hídricos nessa bacia. Por outro lado, níveis elevados de CO<sub>2</sub> podem contribuir para uma melhora na eficiência do uso da água pela planta devido ao aumento da resistência estomática, no entanto, há muitas incertezas se essa melhora contribui apenas marginalmente ou de forma significativa na diminuição da demanda de irrigação (Betts et al., 2007; Rajagopalan et al. 2018).

11. No Brasil, a questão dos riscos associados às mudanças climáticas é especialmente importante quando se trata de agricultura, pois a despeito do bom nível tecnológico, da grande capacidade de produção de alimentos e da importância do setor agrícola para a economia brasileira, dentre as atividades econômicas modernas, a atividade agropecuária é a que está sujeita aos maiores riscos de perdas e oscilações nos volumes produzidos, com impactos negativos para toda a sociedade (Assad et al., 2013). Embora a irrigação, feita de forma sustentável, seja importante alternativa para diminuir a dependência da agricultura em relação ao clima, a consideração do impacto das mudanças climáticas na demanda de irrigação atual e no potencial de expansão futuro subsidia os tomadores de decisão a avaliar as melhores estratégias do seu uso nas mais diferentes regiões brasileiras.

12. O estudo das mudanças climáticas realizado no Atlas Irrigação 2021 avaliou o impacto de cenários climáticos futuros na demanda da irrigação no Brasil no horizonte 2040. Esse impacto será considerado a partir do conceito de disponibilidade hídrica climática (DHC), que utiliza de forma primária a demanda evaporativa de uma cultura de referência (Et0) e a precipitação total (Ptot). A DHC fornece uma estimativa do excedente ou déficit de água no solo para atender à demanda evapotranspirativa e, portanto, é um fator chave que possibilita estimar as necessidades de irrigação da cultura.

13. Um conjunto de modelos climáticos globais (MCGs) foi processado, incluindo a aplicação de técnicas de *downscaling* e correção de viés, com foco na variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração (Et0) e da precipitação (Ptot). Dentre os 40 cenários de clima futuro analisados, três foram selecionados como referenciais por – além de terem tido bom desempenho em representar o clima presente, sendo assim bons candidatos a representar o clima futuro – representarem duas situações-limite (crítica e otimista) e uma intermediária para a irrigação brasileira em 2040. O clima médio histórico observado foi então alterado pelas anomalias de Et0 e Ptot e novas estimativas foram processadas para responder à questão de como as necessidades de irrigação (médias mensais e anuais) poderão mudar nesses diferentes cenários climáticos.

14. A presente Nota Técnica detalha os conceitos, a metodologia e os resultados sobre o Impacto das Mudanças Climáticas na Demanda da Irrigação do Brasil, ampliando a síntese publicada originalmente no Capítulo 5 do Atlas Irrigação 2021 (<http://atlasirrigacao.ana.gov.br>).

## II. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA

15. O clima é fundamental para a agricultura, pois dele dependem a maioria das práticas agrícolas. Cada cultura tem uma condição ideal para que sua germinação, emergência e desenvolvimento ocorram da melhor forma possível. Essa condição não depende apenas da estação do ano mais adequada para aquele cultivo, mas também da temperatura, evapotranspiração e precipitação mais favoráveis ao longo do ciclo da cultura. Tanto a quantidade quanto a distribuição dessas variáveis afetam a produção.

16. De um modo geral, e para fins didáticos, pode-se considerar três grandes componentes da agricultura que são impactados pelas mudanças climáticas: i. a demanda para irrigação, ii. a produtividade agrícola potencial (aqueles alcançáveis em condições livres de estresse) e iii. problemas fitossanitários. Além desses impactos diretos, há preocupação sobre as necessidades futuras de água para a agricultura vis-à-vis a disponibilidade hídrica para outros usos sob os efeitos combinados das mudanças climáticas, que em um cenário de crescimento populacional e de desenvolvimento econômico poderá agravar ainda mais eventuais conflitos pelos usos da água, incluindo a agricultura.

17. O impacto das mudanças climáticas nas necessidades hídricas da irrigação (i) pode ser caracterizado a partir do balanço hídrico atmosférico, que fornece a disponibilidade hídrica climática (DHC) (Konzmann et al., 2013; Wada et al., 2013). O aumento da temperatura contribui significativamente para o aumento da evapotranspiração, que combinado com uma eventual diminuição da precipitação pode ter implicações graves para o estresse hídrico e, portanto, no aumento da demanda da irrigação. É importante destacar que as mudanças de temperatura são

o efeito dominante que descreve mudanças gerais nas demandas de irrigação (Rajagopalan et al. 2018). Além de afetar a evapotranspiração potencial, o aquecimento impacta a sazonalidade, acelerando os estágios fenológicos da cultura, resultando em maiores aumentos na demanda no início do plantio e diminuições eventuais no final. Essas mudanças na sazonalidade também podem ter implicações em relação a concorrência com outros usos da água, podendo aumentar os conflitos. Por outro lado, níveis elevados de CO<sub>2</sub> podem contribuir para uma melhora na eficiência do uso da água pela planta devido ao aumento da resistência estomática. Assim, compreender as mudanças na demanda de irrigação é vital para a preparação e o planejamento da adaptação aos efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos e para alcançar a sustentabilidade na agricultura.

18. Com relação à produtividade agrícola (ii), mesmo sem estar submetido a estresse hídrico, a mudança climática tem efeito direto. Em geral, espera-se que as temperaturas mais altas no período de crescimento da planta tenham um impacto negativo na produção agrícola, uma vez que isso pode acelerar o processo de maturação e aumentar o estresse por calor da planta. Cabe ressaltar que esses impactos dependem da cultura, com cada cultura tendo uma resposta única e algumas culturas sendo mais sensíveis à temperatura do que outras. Além disso, cada cultura tem uma faixa ótima de temperaturas para o crescimento, que varia de acordo com o seu estágio de crescimento, inclusive com algumas culturas sendo favorecidas pelo aumento da temperatura (McGrath e Lobell, 2013).

19. Conforme já destacado, os níveis elevados de concentração de CO<sub>2</sub> geralmente têm um impacto positivo sobre a produtividade das safras, especialmente as que seguem a via fotossintética C3 (Hatfield et al., 2011). Os incrementos nessa produtividade são facilitados pelo aumento da atividade fotossintética da planta. No entanto, a resposta da cultura às mudanças nas concentrações de CO<sub>2</sub> é complexa e depende das espécies da cultura, bem como das interações com temperatura, umidade do solo e manejo de nutrientes. Por exemplo, as variedades C4 de culturas (como milho e cana de açúcar) que têm vias fotossintéticas de CO<sub>2</sub> altamente eficientes, não são tão impactadas por esses aumentos nos níveis de CO<sub>2</sub>. A disponibilidade de nutrientes também modera esses efeitos da fertilização com CO<sub>2</sub> na produtividade das culturas, muitas vezes, com impactos potencialmente insignificantes quando submetidos a baixa disponibilidade de nitrogênio (Tubiello et al., 2007). Assim, a resposta líquida em termos de impacto das mudanças na produtividade de cada cultura depende das magnitudes relativas desses dois efeitos concorrentes: o efeito positivo da fertilização com CO<sub>2</sub> e o efeito negativo do aquecimento.

20. Outros possíveis efeitos da mudança climática estão associados a problemas fitossanitários (iii) que poderão alterar o cenário de doenças e seu manejo que, certamente, causará impacto na produtividade agrícola. Mudanças no padrão espaço-temporal dessas doenças ligadas a agricultura, embora ainda incertos, podem colocar em risco a sustentabilidade dos agrossistemas. Os impactos das mudanças climáticas relacionados aos problemas fitossanitários podem ocorrer de diferentes formas, seja causando impactos diretos na planta hospedeira interferindo no seu crescimento, fisiologia, morfologia, reprodução, sobrevivência e no microclima; ou indiretos, como as mudanças na interação com microrganismos simbiotes, interação com insetos e competição com plantas invasoras. Essas mudanças também podem

impactar o patógeno causador da doença, interferindo, por exemplo, no seu ciclo de vida ou afetando as interações de parasitismo e suscetibilidade do hospedeiro (Angelotti, 2011).

### **Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira**

21. Diversos estudos analisaram os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura brasileira (Margulis et al., 2011) e suas principais commodities, como a soja (Tavares et al., 2010; Zanon et al., 2016), o milho (Resende et al., 2011; Costa et al., 2009) e a cana-de-açúcar (Zullo et al., 2018; Marin et al., 2013; Carvalho et al., 2015). Esses estudos focaram em regiões específicas e consideraram as mudanças relativas em variáveis climáticas individualmente (temperatura, precipitação, concentração de CO<sub>2</sub>).

22. Um dos estudos pioneiros acerca dos impactos das mudanças climáticas na região da Amazônia Legal (que abrange os estados do bioma Amazônia) foram desenvolvidos em Lapola et al. (2011). Nesse estudo, os autores encontraram uma redução na produção de soja, milho e arroz, além de uma redução de 10% na produtividade das pastagens na região em 2050. O estudo aponta que a produtividade reduzida poderia potencialmente diminuir a lucratividade do agricultor, deslocando as safras em direção ao bioma Cerrado.

23. Assad et al. (2016) avaliaram sistematicamente o risco climático futuro das principais commodities brasileiras. Os autores encontraram uma redução de 65,7% na área destinada à produção de soja, principalmente no Sul do Brasil, deslocando as principais regiões produtoras para a porção sudeste da Amazônia. Os impactos na área destinada à produção de milho seriam ainda mais intensos, resultando em queda de 85% até 2050, afetando principalmente o milho safrinha. A safra de milho no verão (primeira safra) seria menos afetada, mas ainda teria redução de área no Nordeste e oeste de São Paulo e sul do Mato Grosso do Sul. Resultados semelhantes também foram identificados em estudos regionais baseados em modelos de regressão entre produtividade e variáveis climáticas (Araújo et al., 2014) ou em modelos econométricos (Feres et al., 2010). Por outro lado, os efeitos do aumento da temperatura podem beneficiar a produtividade da cana-de-açúcar, principalmente no Sul do Brasil, onde o aumento da temperatura deve reduzir a frequência de geadas (Assad et al., 2013a).

24. Com relação aos eventos extremos que afetam a agricultura no Brasil, o Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas (MMA, 2016) apontou uma expectativa de aumento na frequência de ondas de calor em todo o Brasil, com temperaturas máximas diárias acima de 32°C, que são responsáveis pela queda da produção agrícola, uma vez que interferem nas fases do ciclo fenológico das culturas e no desenvolvimento de órgãos vitais das plantas. Espera-se também que por volta de 2050 a produtividade da maior parte das culturas agrícolas do Brasil sofrerá um decréscimo acentuado devido ao excesso de calor. Com relação a veranicos, o Plano apontou que o aumento na frequência dos períodos de estiagem, acompanhado por calor forte insolação e baixa umidade relativa em plena estação chuvosa ou em pleno inverno, podem resultar em maior necessidade de irrigação. O cultivo da soja pode se tornar cada vez mais difícil na região Sul e alguns estados do Nordeste podem perder significativamente sua área agricultável. Por fim, foram apontados aumento da frequência de chuvas e tempestades fortes na região Sul, podendo causar problemas para a mecanização agrícola devido à inundações das áreas cultivadas. Plantações de cana-de-açúcar, trigo e arroz também podem sofrer perdas

devido a ventos fortes, que leva ao acamamento dessas culturas. A pulverização com defensivos contra pragas e doenças será dificultada devido a ventos fortes ou chuva intensa.

25. Mais recentemente, Zilli et al. (2020) quantificaram os impactos das mudanças climáticas na agricultura em termos econômicos, considerando mudanças de área e produção, das principais commodities brasileiras admitindo a competição pelo uso da terra e os aspectos econômicos integrados por meio de um modelo parcial de equilíbrio econômico. O impacto das mudanças climáticas avaliado no estudo sinalizou aumento na competição interna por recursos entre diferentes culturas e produtos, e na competição externa por fatias de mercado. Para soja e milho, duas das principais culturas do Brasil, os cenários projetam um deslocamento (em relação à linha de base) em direção às regiões subtropicais ou quase subtropicais dos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Apesar dessa realocação, espera-se que a produção de ambas as safras diminua, com redução variando entre -6,3% e -36,5% para a soja e entre -12,9% e -29,4% para o milho. A redução da soja ocorre principalmente na região do Matopiba. De acordo com o estudo, as lavouras no leste do Cerrado e no Matopiba tendem a ser substituídas por pasto/pecuária com a diminuição da pecuária em algumas regiões da Amazônia. Ao longo da fronteira do Cerrado com a Mata Atlântica, no centro e sudeste do Brasil, a soja e o milho podem ser substituídos pela cana-de-açúcar. No entanto, os autores destacam que as incertezas acerca da expansão da cana-de-açúcar e das pastagens ainda são grandes.

### III. PROCESSAMENTO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS

26. Os modelos climáticos globais (MCGs) são ferramentas fundamentais na geração de cenários representativos de mudanças climáticas futuras. Esses modelos consideram de forma quantitativa (numérica) o comportamento climático dos principais elementos do sistema terrestre e suas interações, tais como: atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, ciclos biogeoquímicos etc. Possibilitam, assim, que sejam simulados prováveis cenários de evolução do clima considerando cenários de emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

27. Nesse sentido, pode-se representar explicitamente algumas incertezas ao utilizar estes modelos. Uma dessas incertezas está associada a trajetória futura das emissões dos GEE e de aerossóis atmosféricos, que depende de decisões humanas sobre o caminho socioeconômico-ambiental desejado e que venha a ser efetivamente implementado. Outra fonte importante de incerteza advém do fato que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza e diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de evolução das concentrações de GEE e de aerossóis na atmosfera. Com o avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático, espera-se cada vez mais a diminuição dessas incertezas nas projeções das mudanças climáticas em escala regional, no entanto, até que isso se concretize, uma das principais estratégias atualmente adotada é utilizar vários cenários de emissões de GEE e diferentes modelos climáticos.

28. Os dados provenientes do IPCC são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para a confecção do relatório do IPCC-AR5 (Fifth Assessment Report), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante

o século XX e por uma concentração estimada para o século XXI. Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5<sup>1</sup>.

29. Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ao final do século XXI corresponde a X W/m<sup>2</sup>. O cenário RCP4.5, por exemplo, pressupõe que a forçante radiativa estabiliza pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível de radiação a longo prazo de 4,5 W/m<sup>2</sup>. Essa projeção é consistente com a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento fortes e políticas climáticas rigorosas. Além disso, sugere uma estabilização das emissões de metano associadas a um leve aumento das emissões de CO<sub>2</sub> até 2040 até atingir o valor alvo de 650 ppm de CO<sub>2</sub> equivalente na segunda metade do século XXI. Já o cenário RCP8.5 sugere um crescimento contínuo da população associada a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono. Este cenário é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito de estufa, sendo consistente com nenhuma mudança política para reduzir as emissões e a manutenção da forte dependência de combustíveis fósseis.

30. Os Modelos Climáticos Globais (MCGs), de um modo geral, fornecem projeções de clima em escalas espaciais mundiais ou continentais com uma resolução não muito adequada às necessidades exigidas, por exemplo, no âmbito de planos de adaptação de recursos hídricos regional ou setorial. Devido a limitações computacionais e de dados, a resolução desses MCGs é normalmente maior que 100 km, o que limita consideravelmente a sua capacidade de capturar detalhes espaciais nos padrões climáticos necessários ou desejados nas análises regionais ou locais.

31. Em resposta a essa necessidade, são utilizadas técnicas de melhoria na resolução espacial denominadas de *downscaling*, aplicadas no sentido de preencher as lacunas entre o que os MCGs podem oferecer e a qualidade da informação que normalmente é exigida na tomada de decisão.

32. As técnicas de *downscaling* consistem em transferir determinada informação climática obtida em uma escala espacial e/ou temporal menos refinada para uma escala mais refinada. A hipótese principal dos métodos de *downscaling* consiste na ideia de que o clima local é condicionado a partir de interação entre comportamentos atmosféricos de larga escala (padrões de circulação, temperatura, umidade etc.) e características locais (topografia, vegetação, corpos d'água, uso do solo etc.). Deste modo, são incorporadas informações locais aos resultados dos MCGs que possibilitam capturar de forma mais realista o comportamento da informação climática no local.

33. Tradicionalmente, a literatura classifica as técnicas de *downscaling* em dois tipos: dinâmico e estatístico. O *downscaling* dinâmico consiste em utilizar modelos climáticos regionais (MCR), similares aos MCGs em seus princípios, mas com uma alta resolução. O MCR considera, como condição de contorno, a informação atmosférica de larga

---

<sup>1</sup> CMIP5 - The World Climate Research Programme Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5



escala fornecida pelo MCG e incorpora informações locais considerando uma resolução espacial mais refinada, como por exemplo: uma topografia mais complexa, contrastes terra-oceano, heterogeneidades da superfície terrestre, melhorias no detalhamento da representação dos processos físicos etc.

34. O *downscaling* estatístico envolve o estabelecimento de relações empíricas entre as observações das variáveis atmosféricas de larga escala e variáveis climáticas locais. Uma vez que esse relacionamento foi determinado e validado, as variáveis atmosféricas projetadas para o futuro dos MCGs são usadas para estimar as variáveis climáticas locais. Uma importante vantagem em relação ao dinâmico, além do menor custo computacional, está no fato de poder se produzir uma estimativa para um local específico, o que no *downscaling* dinâmico não é possível, tendo em vista que o uso do MCR depende ainda da consideração de uma determinada resolução espacial, embora essa escala seja mais refinada que a oriunda do MCG. É importante destacar que a abordagem estatística depende fundamentalmente da hipótese de que a relação entre as variáveis climáticas de larga escala e as variáveis locais no presente permanecerão válidas sob as diferentes condições do clima futuro.

35. Em junho de 2015, a agência espacial americana (NASA) publicou por meio do projeto "NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections" (NEXGDDP) um conjunto de dados resultantes de um amplo *downscaling* estatístico dos cenários climáticos derivados das rodadas dos MCGs utilizados no âmbito da quinta fase do IPCC denominado de CMIP5 (WCRP Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

36. De acordo com NEXGDDP (2015), o objetivo da geração desses dados é fornecer um conjunto de dados globais, de alta resolução, de projeções de mudanças climáticas com correção de viés que podem ser usados para avaliar impactos das mudanças climáticas sobre os processos que são sensíveis a gradientes de clima em uma escala mais refinada e os efeitos da topografia local sobre as condicionantes climáticas.

37. A geração de dados do projeto NEXGDDP através do *downscaling* estatístico englobou, além do experimento *historical* (experimento controle retrospectivo), as projeções RCP4.5 e RCP8.5 (correspondentes às forçantes radiativas de 4,5 e 8,5 W/m<sup>2</sup>, respectivamente) de 21 modelos climáticos utilizados no CMIP5 com discretização temporal diária. A resolução espacial adotada no NEXGDDP foi de 0.25° graus (aprox. 25 km x 25 km) de modo que os dados produzidos apresentam sempre a mesma grade, independentemente do modelo climático. A figura 1 ilustra a grade do projeto NEXGDDP recortada para o Brasil. O período de dados do experimento controle *historical* é de 1950 a 2005 (período adotado pelo NEXDDP). O período de dados disponíveis para as projeções RCP4.5 e RCP8.5 é de 2006 a 2100. O experimento *historical* é essencial no estudo para seleção dos modelos que melhor representam o comportamento climático observado no presente.

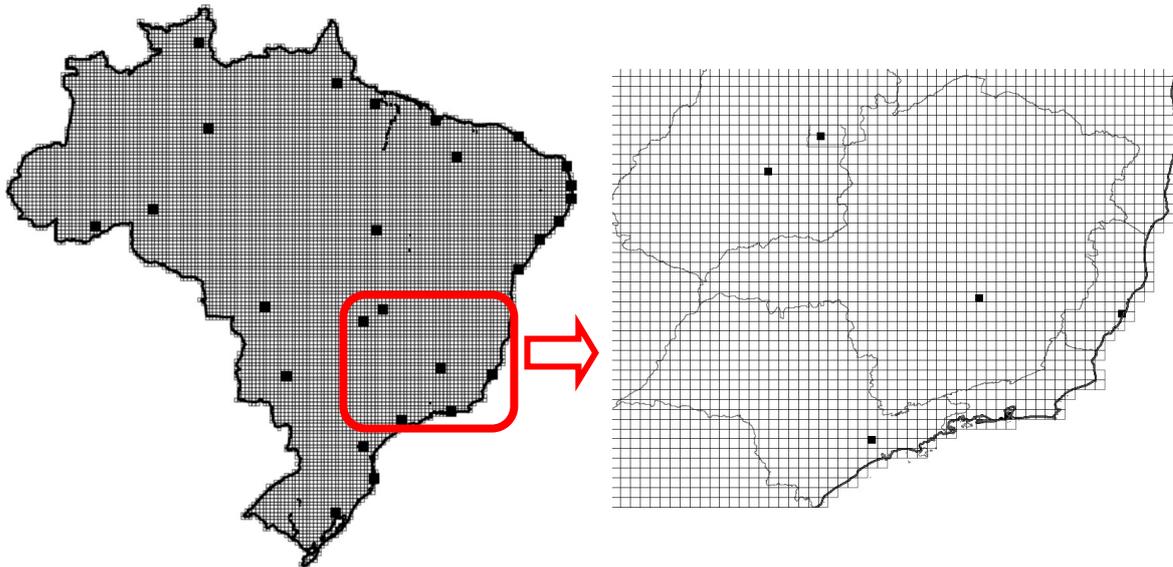


Figura 1 - Grade do projeto NEXGDDP recortada para o Brasil e zoom da grade na região sudeste do Brasil.

38. O procedimento de *downscaling* estatístico empregado no NEXGDDP foi realizado a partir do método de correção de viés por desagregação espacial BCSD (*Bias-Correction Spatial Disaggregation* em inglês), o qual foi desenvolvido especificamente para tratar das limitações atuais das saídas dos MCGs. O método BCSD envolve basicamente duas etapas: a etapa de correção de viés (BC) e a etapa de desagregação espacial. Na etapa de correção de viés (BC) é utilizada a técnica de mapeamento quantil-quantil (Bárdossy e Pegram, 2011). Esse procedimento se baseia na comparação das funções cumulativas de probabilidade (curvas que mostram a probabilidade de a variável ser menor ou igual a um determinado valor) da variável observada e da variável estimada por um modelo climático para o período atual e para o futuro. Os dados observados utilizados no projeto NEXGDDP foram a base de dados em grade de dados observados do GFMD (Global Meteorological Forcing Dataset) gerado pela universidade de Princeton (Sheffield et al. 2006).

39. Na etapa de desagregação espacial (SD) do projeto foi realizado um procedimento de interpolação espacial linear nos dados com viés corrigido oriundos da etapa BC para a grade de 0,25° dos dados observados GFMD. Nessa etapa de desagregação é considerado um fator de escala que objetiva preservar as principais características dos dados espaciais. Esse fator de escala é definido a partir da climatologia observada e é aplicado nos dados dos MCGs já interpolados. Maiores detalhes referentes à metodologia BCSD podem ser encontrados em Thrasher et al. (2012)<sup>2</sup>.

40. Embora o projeto do NEXGDDP contemple 21 modelos, no presente estudo foram utilizados 20 modelos, tendo em vista que um dos modelos apresentou fortes inconsistências nos resultados. Assim ao todo, foram utilizados 40 cenários de clima futuro, considerando 20 MCGs e 2 cenários de emissão (RCP45 e RCP85). A tabela 1 apresenta os nomes dos modelos

<sup>2</sup> Maiores detalhes do projeto e de como efetuar o download dos dados podem ser obtidos em: <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp>



climáticos do projeto NEXGDDP, a instituição que os desenvolveu, a resolução original e a quantidade de camadas verticais (CV) do modelo. As variáveis climáticas existentes no projeto são a temperatura máxima, temperatura mínima e a precipitação.

Tabela 1 - Modelos Climáticos utilizados no projeto NEXGDDP.

nº	Modelo	Instituição	Resolução (Latº x Lonº)	CV
1	ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology, Australia	1.875° × 1.25°	38
2	BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China	2.8° × 2.8°	26
3	BNU-ESM	Beijing Normal University, China	2.8° × 2.8°	26
4	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada	2.8° × 2.8°	35
5	CCSM4	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	1.25° × 0.9°	27
6	CESM1-BGC	National Science Foundation, Department of Energy and NCAR, USA	1.25° × 0.9°	27
7	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques and Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique, France	1.4° × 1.4	31
8	CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia	1.875° × 1.875°	18
9	GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2.5° × 2.0°	48
10	GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2.5° × 2.0°	24
11	GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2.5° × 2.0°	24
12	INMCM4	Institute for Numerical Mathematics (INM), Russia	1.5° × 2.0°	21
13	PSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	3.75° × 1.895	39
14	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	2.5° × 1.27°	39
15	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1.4° × 1.4°	40
16	MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	2.8° × 2.8°	80
17	MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	2.8° × 2.8°	80
18	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.875° × 1.875°	47
19	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.875° × 1.875°	95
20	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	1.125° × 1.125°	48
21	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	2.5° × ~ 1.89°	26

41. Entretanto, como o cálculo do consumo hídrico diário da cultura para fins de irrigação é feito, normalmente, com base na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), é necessário estimar essa variável para o futuro a partir dos dados disponíveis. O modelo padrão para essa estimativa é o de Penman-Monteith, o qual requer dados que não estão disponíveis no projeto NEXGDDP. Assim, foi utilizado, para a estimativa de anomalias de evapotranspiração potencial, o modelo de Hargreaves, que emprega um menor número de variáveis. Hargreaves e Samani (1985) propuseram a seguinte equação para estimativa da ET<sub>o</sub> utilizando apenas os valores das Temperaturas máxima, mínima e média do ar e da radiação no topo da atmosfera:

$$Et_0 = 0,023 \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,8) R_a \quad (1)$$

em que a T<sub>max</sub> é temperatura máxima, T<sub>min</sub> é temperatura mínima, T<sub>med</sub> é temperatura média em °C e o R<sub>a</sub> é a radiação extraterrestre do dia em mm d<sup>-1</sup>.

42. Os dados do NEXGDDP já foram empregados em alguns estudos de impactos de mudanças climáticas no Brasil nas escalas regional e nacional. Em estudos regionais, por exemplo, esses dados já foram empregados na avaliação do impacto das mudanças climáticas no Distrito Federal e região integrada de desenvolvimento do DF (Menezes et al., 2016) e na disponibilidade hídrica na bacia do Rio Grande no âmbito do plano dessa bacia (ANA, 2018). Esses dados foram também utilizados na análise do impacto das mudanças climáticas no zoneamento de aptidão climática das principais frutíferas de clima temperado nas regiões sul e sudeste do Brasil (Santos, 2018). Já na escala nacional, os estudos focaram na análise do impacto das mudanças climáticas nos extremos de precipitação (Souza e Reis, 2017; Cortez, 2020) e de temperatura (Avila-Diaz et al., 2020b).

43. Recentemente, Avila-Diaz et al. (2020a) realizaram uma importante avaliação do desempenho de 25 MCGs em representar características importantes do clima presente no Brasil, sendo 21 desses modelos oriundos do NEXGDDP e 4 modelos regionais desenvolvidos por meio de um *downscaling* dinâmico obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram utilizados índices climáticos de extremos de temperatura e precipitação no período de 1980 a 2005. Como dados observados, foram utilizadas estações meteorológicas e a grade de dados do GFMD adotadas no âmbito do projeto NEXGDDP. A partir de diferentes métricas de desempenho, foi desenvolvido um ranqueamento dos modelos no qual obteve-se aqueles modelos que melhor representavam o clima observado no presente. Os resultados mostraram que os dados dos MCGs oriundos do *downscaling* estatístico do NEXGDDP foram capazes de reproduzir os índices climáticos observados, apresentando um desempenho superior aos modelos oriundos do INPE. A classificação geral mostrou que três modelos do NEXGDDP apresentaram um desempenho superior em detrimento de todos os outros: CNRM-CM5, CCSM4 e MRI-CGCM3. Essa classificação foi considerada na seleção de cenários climáticos futuros do Atlas Irrigação.

### **Correção de vies de dados climáticos dos MCGs**

44. Os climas do presente e do futuro são representados por modelos climáticos. No entanto, esses modelos não conseguem representar perfeitamente o clima do presente e seus resultados apresentam erros. Esses erros são sistemáticos e causados por uma imperfeita conceitualização dos fenômenos e processos que governam o clima e pela influência da discretização espacial dos modelos. Nesse sentido, a etapa de remoção de vies nas variáveis

climatológicas é de vital importância, evitando que erros intrínsecos aos modelos climáticos sejam propagados.

45. Embora originalmente os dados climáticos do NEXGDDP tenham passado pelo processo de correção de viés, observou-se que essa correção não foi suficiente, tendo em vista diferenças na magnitude dos valores das variáveis analisadas e padrões sazonais pouco representativos do clima observado no Brasil. Essas diferenças podem ter sido oriundas da qualidade ruim da grade de dados observadas utilizadas na correção de viés do projeto.

46. A metodologia de remoção de viés aplicada nesta Nota Técnica foi a denominada mapeamento quantil-quantil (Bárdossy e Pegram, 2011), a mesma utilizada no projeto NEXGDDP. Essa abordagem é baseada na comparação das funções cumulativas de probabilidade de não excedência (curvas que mostram a probabilidade da variável ser menor ou igual a um determinado valor) da variável observada e da variável estimada por um modelo climático no período atual e futuro. O método segue o procedimento a seguir, para série mensal:

- Os dados mensais dos modelos climáticos de cada mês do ano são agrupados e são estimadas as funções cumulativas de probabilidade no período atual. Dessa forma, para cada modelo, 12 funções cumulativas de probabilidade são estimadas, uma para cada mês do ano.
- Os dados observados de cada mês do ano são agrupados e são estimadas as funções cumulativas de probabilidade, aqui foi utilizado a distribuição Gumbel.
- Procedimento para remoção de viés no período atual: para cada valor mensal da série da variável analisada, pertencente ao mês do ano para o qual foram estimadas as funções cumulativas de probabilidade, é identificado o valor da probabilidade acumulada na série do modelo climático. Posteriormente, o valor mensal corrigido é igual ao valor observado que apresenta o mesmo valor de probabilidade acumulada.
- Procedimento para remoção de viés no período futuro: para cada valor mensal da série futura da variável analisada, pertencente ao mês do ano para o qual foram estimadas as funções cumulativas de probabilidade, é identificado o valor da probabilidade acumulada na série atual do modelo climático. Posteriormente, o valor mensal corrigido no período futuro é igual ao valor observado que apresenta o mesmo valor de probabilidade acumulada.

### **Avaliação dos Dados Climáticos dos MCGs**

47. Há várias dificuldades em se prever o clima futuro. O comportamento do sol é difícil de se prever. Perturbações de curto prazo com o El Niño ou erupções vulcânicas são difíceis de se calcular num modelo. Contudo, as maiores forçantes que determinam o clima são bem compreendidas. Assim, há duas grandes perguntas quando se faz uso de modelos climáticos para avaliação de impacto - eles podem reproduzir com precisão o passado, e podem com sucesso prever o futuro? Com base na resposta positiva à primeira pergunta, normalmente considera-se que o modelo é um bom candidato a projetar de forma plausível o clima futuro. Assim, é de

vital importância avaliar a capacidade dos modelos em representar o clima presente para considerá-lo um candidato a projetar o clima futuro.

48. Essa avaliação no presente estudo foi realizada a partir de dados observados e dos dados do experimento *historical* de cada modelo após a correção de viés. Foram considerados mais de 3.500 estações pluviométricas do banco de dados HIDRO da ANA e os dados em grade de temperatura e precipitação desenvolvidos em Xavier et al. (2015). Essa grade regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  de latitude/longitude foi construída a partir de dados interpolados de 9.259 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas cobrindo todo o território brasileiro durante o período 1980-2015 (Xavier et al. 2015, 2017<sup>3</sup>). Cabe ressaltar que, para avaliação dos modelos, foi considerado o período de 1980 a 2005 dos dados observados, compatível com os experimentos do presente (*historical*).

49. Os resultados dessa avaliação mostraram que todos os 20 modelos considerados do projeto NEXGDDP, após a correção de viés, conseguiram reproduzir adequadamente características estatísticas do clima observado no presente, tanto espacial como temporalmente. Foram consideradas a escala temporal anual e sazonal nas avaliações. Esses resultados estão em consonância com os estudos anteriores que utilizaram os dados do NEXGDDP no Brasil, notadamente com os resultados apresentados em Avila-Diaz et al. (2020a). No entanto, diferentemente do realizado em Avila-Diaz et al. (2020a) que buscou classificar o desempenho dos modelos, as avaliações aqui realizadas não tiveram esse objetivo. Cabe ressaltar que, além das análises realizadas nesse estudo, considerou-se também no processo de seleção dos cenários futuros a classificação adotada em Avila-Diaz et al. (2020a).

### **Transferência para a grade do Atlas de Irrigação**

50. As informações originalmente utilizadas, sejam observadas ou oriundas dos MCGs, estão dispostas espacialmente de diferentes formas e escalas. No entanto, a fim de uniformizar espacialmente todas as informações de modo a possibilitar avaliar a variabilidade espacial de forma mais consistente e tornar a análise compatível com as informações de clima já existentes no Atlas Irrigação, foi necessário transferir todas as informações para a grade de referência original do Atlas de Irrigação. Para isso, foi utilizada a técnica de interpolação do inverso do quadrado da distância (IDW) considerando os 4 pontos mais próximos da grade, sejam esses pontos estações pluviométricas ou pontos de outras grades como a da base de dados observados do Xavier (Xavier et al. 2015, 2017) ou dos MCGs do projeto do NEXGDDP.

51. Ou seja, os cenários de mudanças do clima analisados resultaram, em última instância, em mapas mensais de anomalia de evapotranspiração potencial e de precipitação em 2040, permitindo recalcular as demandas hídricas médias mensais, mantendo-se os demais parâmetros (como áreas irrigadas) inalterados em relação ao clima de base em 2040 (média mensal histórica até 2019). Essa análise será detalhada a seguir.

---

<sup>3</sup> O conjunto de dados está disponível em <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>



## IV. ANÁLISE DOS CENÁRIOS FUTUROS DO CLIMA

### Anomalia Relativa Sazonal

52. A representação e avaliação dos cenários futuros do clima, tanto para a evapotranspiração potencial (Et0) como para precipitação total (Ptot), é desenvolvida a partir da definição de anomalia relativa sazonal. Essa avaliação é baseada no método de perturbação, fator de mudança ou abordagem delta de variação (Prudhomme et al., 2002). Na sua versão mais simples, o método baseia-se em determinar as diferenças entre o período de controle, o qual corresponde ao período histórico, e os períodos de simulação futuros na forma de Fatores de Variação (FV), aqui chamados de anomalias (A). Uma vez que estas diferenças são identificadas, elas são aplicadas ao período observado apenas adicionando ou multiplicando o FV à média climática de cada mês ou dia.

53. Para o cálculo dessa anomalia, considerou-se a equação 2, dada pela diferença entre a média mensal do cenário de determinado período futuro do século XXI e média mensal do cenário histórico sobre essa mesma média mensal do século XX. O período adotado no presente será de 1980 a 2005. O período futuro a ser considerado será o ano de 2040, definido a partir da média entre os anos de 2039 a 2041. Esse período corresponde ao horizonte do atlas para fins dessa avaliação de mudanças climáticas.

$$A_{var,mes,2040}^{j,k} = \frac{X_{var,mes,2040}^{j,k} - X_{var,mes,xx}^j}{X_{var,mes,xx}^j} \quad (2)$$

Onde  $X_{var,mes,2040}^{j,k}$  é o valor de determinado mês de determinada variável var (Et0 ou Ptot) adotado para o ano de 2040 de determinado modelo j e cenário de emissão k e  $X_{var,mes,xx}^j$  é o valor de determinado mês de determinada variável var (Et0 ou Ptot) adotado para o histórico do presente (1980 a 2005) de determinado modelo j, no caso do presente do modelo não tem cenário de emissão. O valor absoluto da variável a ser adotado no futuro será definido a partir da adição dessa anomalia em termos absolutos na climatologia adotada no atlas.

### Seleção de cenários

54. Após a definição das anomalias relativas futuras (2040) para todos os modelos e cenários de emissão, foi necessário, para fins do Atlas Irrigação, selecionar cenários futuros de clima que serão utilizados na avaliação do impacto na demanda da irrigação. É importante diferenciar conceitualmente os cenários de emissão dos cenários de clima futuro. Esse último representa o clima futuro como um todo, ou seja, é composto da combinação modelo e cenário de emissão.

55. O desenvolvimento desses cenários de clima futuro deve considerar as necessidades dos usuários (Parson, 2008), principalmente, dos tomadores de decisão que utilizam os resultados decorrentes dos cenários como informação no processo de decisão. Esses tomadores de decisão de um modo geral estão interessados em identificar decisões robustas que levariam a resultados aceitáveis em um amplo espectro do futuro, como por exemplo: um agricultor tendo que decidir sobre um investimento em determinada cultura ou ampliação da sua área irrigada face à incerteza do clima.

56. Nesse sentido, o ideal é que seja considerada uma gama representativa de cenários, de modo que sejam consideradas e explicitadas de forma fidedigna as principais

incertezas envolvidas. Por outro lado, quando busca-se avaliar o impacto de forma mais comparativa, a partir de cenários contrastantes, pode-se neste caso utilizar um pequeno conjunto de cenários, variando em características para as quais o tipo de decisão a ser tomada pode ser mais sensível e de maior utilidade (Groves and Lempert, 2007). Esta abordagem de selecionar um pequeno conjunto de cenários é a adotada nesse estudo, e é derivada das inúmeras projeções futuras que foram geradas a partir dos dados do NEXGDDP, sendo sua escolha muito particular às condições enfrentadas e consideradas no Atlas Irrigação.

57. Dentre os 40 cenários de clima futuro, foram considerados nesse estudo três para avaliação do impacto na demanda da irrigação. Os critérios de seleção são detalhados a seguir.

58. Uma questão fundamental no processo de seleção de cenários é o entendimento da necessidade de incorporar no processo a visão setorial em análise, que nos possibilita pensar cenários mais plausíveis e traz a chance de obter respostas mais efetivas sobre a situação do setor avaliado, nesse caso a agricultura, frente aos desdobramentos das mudanças no clima. Assim, para a seleção de cenários realizada foram considerados três fatores: os municípios com demanda de irrigação, a magnitude estimada dessa demanda e a magnitude da mudança climática expressa pela anomalia futura tanto da evapotranspiração (Et0) como da precipitação (Ptot). Para consideração desses fatores foi necessário inicialmente identificar todos os municípios com demanda de irrigação e sua magnitude (Dirrigmun), sendo para isso utilizadas as estimativas de demandas de irrigação municipal em 2017 do Manual de Usos Consuntivos da Água (ANA, 2019).

59. No entanto, como as anomalias da mudança climática das variáveis consideradas estão espacialmente distribuídas na grade do Atlas Irrigação, foi necessário associar para cada município quais os pontos de grade estão contidos na área do município. Assim, a demanda de irrigação total do município era distribuída proporcionalmente na área de cada ponto de grade associado, sendo possível combinar na base municipal os valores de anomalia definidas na grade do Atlas. Feito essa associação entre as bases (demanda municipal x grade do atlas), a métrica básica, denominada de anomalia na demanda (AD), foi utilizada para selecionar os cenários, e é baseada na seguinte expressão:

$$AD_{var,mun,2040}^{j,k} = \sum_{mes=1}^{12} \sum_{grd=1}^{ngrdmun} Dirrig_{mes,grd} \times A_{var,mes,2040}^{j,k} \quad (3)$$

Onde, ngrdmun é o número de pontos de grades associados a determinado município (mun),  $Dirrig_{mes,grd}$  é a demanda de irrigação total de determinada grade associada a determinado município em determinado mês. Esse somatório das demandas de irrigação total em cada ponto de grade deve ser igual a demanda total de irrigação do município em determinado mês, conforme equação 5 abaixo.

$$Dirrigamun_{mes} = \sum_{grd=1}^{ngrdmun} Dirrig_{mes,grd} \quad (4)$$

60. Essa métrica  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  considerada para seleção de cenários, expressa em um só valor a existência ou não de irrigação em determinado município (importância espacial), a magnitude dessa demanda e a magnitude da mudança das variáveis climáticas envolvidas (Et0 e Ptot). A magnitude e o sinal dessa métrica exprimirá o quanto determinado município necessitará de uma maior ou menor quantidade de água necessária para irrigação.

61. Para a variável Ptot quanto maior e com sinal negativo for o valor de  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  maior será a chance da demanda de irrigação de determinado município ser

maior no futuro caso o cenário projetado pelo modelo  $j$  e emissão  $k$  ocorrer de fato. Isso se deve em função de maiores valores de anomalia negativa na variável  $P_{tot}$  indicam mudanças mais fortes no sentido de termos menos chuvas no futuro e associado com maiores valores de demandas de irrigação indicam que essa menor quantidade de chuva irá impactar de forma ainda mais pronunciada a região. É importante perceber que é considerada nessa métrica a sazonalidade tanto da mudança como da demanda, por exemplo, se em determinado município as anomalias de precipitação forem positivas em 11 meses e em apenas 1 mês tiver uma anomalia alta e negativa, e se esse único mês for aquele em que de fato se tem demanda de irrigação, a métrica irá indicar maior chance da demanda de irrigação ser maior no futuro para esse município.

62. Cabe ressaltar que a consideração dessa sazonalidade na métrica, por não considerar todas as nuances que a mudança climática pode incorrer na disponibilidade hídrica para irrigação, não necessariamente reflete uma certeza de melhor ou pior condição hídrica para irrigação no futuro, pois considerando o exemplo anterior, pode ser que a água excedente da precipitação nos meses sem demanda para irrigação pode ser utilizada para suprir a demanda maior no mês com irrigação. No entanto, como o objetivo é avaliar o impacto na demanda da irrigação e não no balanço hídrico, a métrica  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  é adequada para esse propósito específico. Para a variável  $Et_0$  a lógica é a mesma, sendo que o sinal da mudança deve ser positivo, uma vez que maiores valores de anomalia positiva na variável  $Et_0$  indicam mudanças mais fortes no sentido de termos uma maior evapotranspiração da cultura no futuro, e por conseguinte, requerer uma maior quantidade de água para irrigação.

63. Para seleção dos três cenários utilizados para a estimativa de demanda de irrigação no futuro, foram utilizados três critérios para classificar os 40 cenários futuros do clima (modelo + cenários de emissão) e, de posse dessa classificação, foram definidos e justificados esses cenários. Os critérios utilizados foram todos definidos a partir da métrica  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$ . A ordem de classificação, independentemente do critério e da variável considerada, será sempre do cenário mais propenso a indicar maior demanda de irrigação para o menos propenso. Assim o cenário que foi classificado em 1º, seja para  $P_{tot}$  ou  $Et_0$ , indica maior propensão a maior demanda de irrigação no futuro em detrimento dos outros cenários.

64. O primeiro critério considerou inicialmente para cada município, em qual quartil da distribuição empírica de não excedência formada a partir dos 40 valores de  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  determinado cenário futuro (modelo + cenário de emissão) se encontrava. Depois foi calculado o percentual em cada quartil de cada um desses cenários. A classificação final desse primeiro critério foi obtida a partir da ordenação dos cenários futuros com maior percentual no primeiro quartil para a variável  $P_{tot}$  e no último quartil para a  $Et_0$ . Assim o cenário que foi classificado em 1º para a  $P_{tot}$  foi aquele que mais frequentou o primeiro quartil, ou seja, com menores valores da métrica em relação a outros cenários. Esse critério sinaliza a quantidade de regiões que determinado cenário está propenso a indicar maior demanda de irrigação numa comparação entre os cenários.

65. No entanto, esse primeiro critério apenas avalia o quanto determinado cenário é mais crítico que outro, sem entrar no mérito se de fato haverá um aumento ou diminuição na demanda pra irrigação, uma vez que, caso hipoteticamente todos os cenários de precipitação

tivessem anomalia positiva (aumento de chuvas), o cenário classificado em 1º para a Ptot apenas indicaria que para esse cenário específico a diminuição na demanda por irrigação será menor em relação a outros cenários. Assim, o segundo e o terceiro critérios foram desenvolvidos para considerar o sinal da mudança de fato.

66. O segundo critério corresponde a uma agregação dos valores de  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  para todos os municípios, conforme equação 7. Assim, para cada cenário futuro, e considerando a variável Ptot, quanto menor e negativo for esse indicador  $AD_{var,2040}^{j,k}$  maior será propensão a maior demanda de irrigação no futuro em relação ao presente, nesse sentido a classificação dos cenários por esse critério é simplesmente ordenando os 40 valores de  $AD_{var,2040}^{j,k}$  em ordem crescente para o caso do Ptot e decrescente para o caso do Et0

$$AD_{var,2040}^{j,k} = \sum_{mun=1}^{nmun} AD_{var,mun,2040}^{j,k} \quad (5)$$

67. Por fim, o terceiro critério buscou avaliar o percentual de vezes que a métrica  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  foi negativo para o caso do Ptot e positivo para o Et0, e simplesmente realizou a classificação dos cenários ordenando esse percentual em ordem crescente.

68. De um modo geral, antes de entrar na classificação propriamente dita, os resultados obtidos a partir desse processo de seleção de cenários evidenciaram o consenso de que as temperaturas estão aumentando e por consequência todos os cenários de Et0 apontam também para um aumento. O que diferencia é a magnitude desse aumento.

69. Essa convergência de resultados, entretanto, não se aplica aos cenários climáticos de precipitação. De forma geral, os resultados mostram que há grande variação nessa estimativa: há tendência tanto de aumento quanto de diminuição. Os modelos apontam para todo tipo de possibilidade em termos de projeções da precipitação, e essa variabilidade fica bem evidente nas mais diferentes escalas de análise dentro do Brasil.

70. A tabela 2 ilustra os resultados da classificação dos cenários futuros do clima considerando os 3 critérios. Os valores dentro das colunas indicam a ordem de cenário para determinado critério e variável. Por exemplo, o cenário BNUESM\_rcp45 foi o primeiro no critério 1 para a variável Ptot e apenas o décimo quarto para a variável Et0. É importante lembrar que essa ordem é sempre no sentido do cenário mais propenso a indicar maior demanda de irrigação para o menos propenso. Observa-se inicialmente que a maioria dos modelos mantiveram certa coerência, independentemente dos cenários de emissão considerados, ou seja, quando um determinado modelo sinalizava uma diminuição na precipitação no cenário RCP4.5, o mesmo modelo sinalizava essa mesma diminuição para o cenário RCP8.5. A diferença se restringia à magnitude da mudança. Observa-se também, como esperado, que os cenários futuros considerando o cenário de emissão RCP8.5 apresentaram um aumento na Et0 mais pronunciado, em virtude do maior aumento da temperatura desse cenário em detrimento do RCP4.5. Já para a variável Ptot esse padrão não existe.

Tabela 2 – Classificação dos cenários de clima futuro considerando os 3 critérios adotados. Os cenários adotados estão destacados em vermelho (crítico), amarelo (intermediário) e azul (otimista).

cenário	Critério 1		Critério 2		Critério 3		cenário	Critério 1		Critério 2		Critério 3	
	Ptot	Et0	Ptot	Et0	Ptot	Et0		Ptot	Et0	Ptot	Et0	Ptot	Et0
ACCESS10_rcp45	23	22	22	24	28	27	GFDLESM2M_rcp45	8	20	7	21	9	5
ACCESS10_rcp85	9	4	40	6	23	17	GFDLESM2M_rcp85	16	32	19	36	16	26
bccsm11_rcp45	28	19	21	9	24	6	inmcm4_rcp45	30	39	27	31	33	36
<b>bccsm11_rcp85</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>16</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	inmcm4_rcp85	36	40	34	34	30	16
BNUESM_rcp45	1	14	2	18	3	25	IPSLCM5ALR_rcp45	40	27	32	27	38	32
BNUESM_rcp85	34	23	28	19	36	14	IPSLCM5ALR_rcp85	33	18	30	28	29	28
CanESM2_rcp45	17	2	12	3	10	2	IPSLCM5AMR_rcp45	18	24	14	25	19	29
CanESM2_rcp85	5	1	17	1	11	1	IPSLCM5AMR_rcp85	35	16	29	30	34	38
CCSM4_rcp45	10	9	13	10	6	10	MIROC5_rcp45	14	36	31	40	21	37
<b>CCSM4_rcp85</b>	<b>7</b>	<b>26</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>13</b>	MIROC5_rcp85	24	35	20	35	15	34
CESM1BGC_rcp45	37	21	36	17	39	15	MIROCESM2CHM_rcp45	11	3	9	2	14	23
CESM1BGC_rcp85	29	6	35	7	31	18	MIROCESM2CHM_rcp85	4	7	3	4	4	24
<b>CNRMCM5_rcp45</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>33</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	MPIESMLR_rcp45	15	28	6	26	18	22
CNRMCM5_rcp85	20	11	24	14	22	8	MPIESMLR_rcp85	13	38	10	37	20	35
CSIROMk360_rcp45	25	29	26	20	13	20	MPIESMMR_rcp45	27	34	18	33	26	30
CSIROMk360_rcp85	21	15	25	13	25	12	MPIESMMR_rcp85	19	33	4	29	12	33
GFDLCM3_rcp45	22	13	15	12	17	11	MRIGCM3_rcp45	39	31	38	38	37	31
GFDLCM3_rcp85	3	10	8	11	7	9	MRIGCM3_rcp85	31	12	23	32	27	39
GFDLESM2G_rcp45	2	8	1	15	1	4	NorESM1M_rcp45	32	17	39	16	35	3
GFDLESM2G_rcp85	26	25	37	23	32	21	NorESM1M_rcp85	12	30	11	22	8	19

71. Observa-se também na tabela 2 que os cenários classificados como mais secos, olhando só a Ptot, foram os GFDLESM2G\_rcp45, BNUESM\_rcp45 e o MIROCESM2CHM\_rcp85 considerando o agregado dos 3 critérios. Já os mais secos olhando agora só a Et0, foram os cenários CanESM2\_rcp85, CanESM2\_rcp45 e o bccsm11\_rcp85 considerando também o agregado dos 3 critérios. Já os cenários mais úmidos, com aumento na precipitação, foram os CNRMCM5\_rcp45, CESM1BGC\_rcp45 e o MRIGCM3\_rcp45. Os cenários com menor aumento da Et0 foram os MPIESMLR\_rcp85, MIROC5\_rcp45 e o CNRMCM5\_rcp45. Embora esses cenários de clima futuro representem os extremos, e por isso serem bons candidatos a serem selecionados, outros fatores como o desempenho em representar as características do presente também são consideradas no processo final de seleção, conforme veremos a seguir.

72. A partir dos resultados da classificação dos cenários futuros do clima considerando os 3 critérios definidos anteriormente e apresentados na tabela 2, e levando também em conta o desempenho dos modelos em representar o clima do presente realizado tanto nesse estudo como também em Avila-Diaz et al. (2020a) e, por fim, tendo a necessidade de selecionar 3 cenários de clima futuro, adotaram-se os seguintes cenários: bccsm11\_rcp85, CCSM4\_rcp85 e CNRMCM5\_rcp45.



73. Os três cenários tiveram um bom desempenho em representar o clima presente, inclusive os modelos CCSM4 e CNRMCM5 foram considerados os melhores na classificação adotada por Avila-Diaz et al. (2020a).

74. O cenário composto pelo modelo bccsm11 e cenário de emissão RCP8.5 é propenso a ter um aumento da demanda de irrigação, tendo em vista ele ter sido classificado como um dos modelos com menores chuvas e maiores Et0 nas regiões com irrigação. O cenário CCSM4\_rcp85 também é um cenário propenso a ter um aumento da demanda, tanto que sinaliza chuvas menores que o cenário bccsm11. No entanto, ele tem uma mudança menos intensa na Et0. Já o cenário CNRMCM5\_rcp45 seria aquele considerado otimista sob o ponto de vista da irrigação, pois em relação aos outros cenários, ele é o que chove mais e o que tem menores aumentos na Et0. A figura 2 ilustra os resultados no mapa de municípios do sinal da métrica  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  o qual as cores vermelhas indicam maior propensão para aumento na demanda de irrigação (negativo para a Ptot e positivo para a Et0) nos municípios, azul uma menor propensão para aumento na demanda de irrigação (positivo para a Ptot e negativo para a Et0) e em cinza correspondem aos municípios onde não tem demanda de irrigação ou onde as mudanças não apontam de forma significativa para uma mudança na demanda de irrigação.

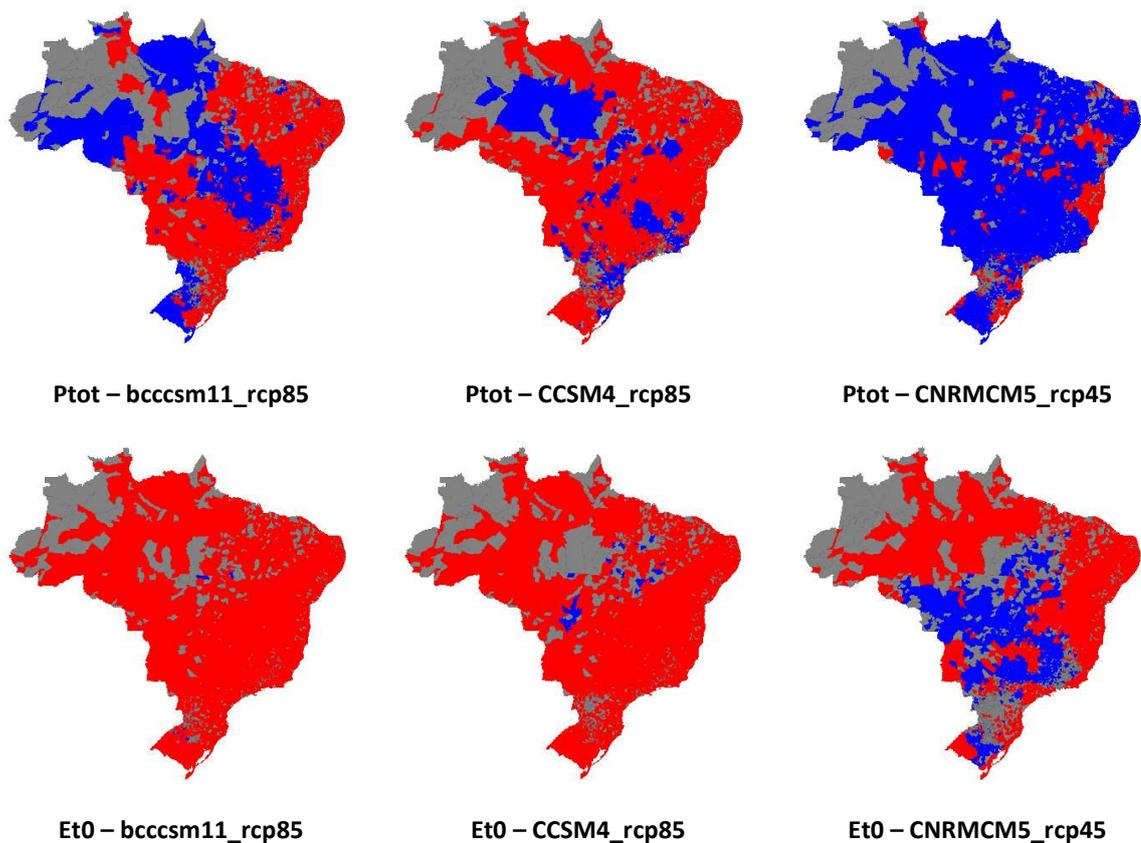


Figura 2 – Sinal da métrica  $AD_{var,mun,2040}^{j,k}$  para os 3 cenários de clima futuro selecionados. Vermelho maior demanda de irrigação, azul menor demanda e cinza sem mudança.

## V. ANOMALIAS DE CLIMA FUTURO E IMPACTO NA DEMANDA HÍDRICA EM 2040

### Anomalias de Clima em 2040

75. As figuras 3 a 8 ilustram os resultados para cada mês da anomalia entre a  $P_{tot}$  ou a  $E_{t0}$  em 2040 e o clima presente, conforme equação 2, para os três cenários selecionados: `bccsm11_rcp85`, `CCSM4_rcp85` e `CNRMCM5_rcp45`.

76. Os mapas ilustram uma alta variabilidade intra-anual da mudança (expressa pela anomalia) na precipitação, o que implica em maiores incertezas na definição da agricultura irrigada no Brasil. Essa maior variabilidade pode estar associada a uma tendência do clima mais quente em produzir extremos de precipitação (Westra et al., 2013), levando em determinado mês a ter uma seca muito intensa e no mês subsequente produzir fortes precipitações, aumentando muito os totais precipitados desse mês.

77. Os dois cenários mais críticos em termos de menor disponibilidade de chuvas no futuro (Figuras 3 e 4), apresentam também meses com aumentos relativos na precipitação, no entanto as maiores diminuições ocorrem justamente nas regiões e nos meses com maiores demandas de irrigação atualmente instaladas. Isso demonstra a necessidade de considerar a condição espaço-temporal do setor da agricultura na análise de mudanças climáticas.

78. Já o cenário `CNRMCM5_rcp45`, mais úmido (Figura 5), também apresenta meses com menores precipitações relativas, no entanto essas mudanças se concentram na maioria dos casos nos meses mais úmidos, onde a demanda de irrigação atual não é tão intensa, o que por outro lado, pode ensejar em problemas locais em relação a disponibilidade hídrica. Entretanto, tanto esse cenário quanto os demais mostram tendência de redução de chuvas no período de 2ª safra (ou safrinha) em muitas regiões produtoras, que se concentra entre fevereiro e maio, o que pode, caso se concretize, inviabilizar a produção de sequeiro nesse período e intensificar a busca da irrigação como medida mitigadora ou de adaptação.

79. Com relação aos cenários de evapotranspiração potencial ( $E_{t0}$ ) (Figuras 6 a 8), observa-se uma variabilidade intra-anual bem menor em relação a  $P_{tot}$ . A magnitude das mudanças também é bem inferior sendo, na maior parte dos casos, provocado pelo aumento da  $E_{t0}$  em no máximo 15% em relação ao clima médio presente. É importante salientar que a diminuição relativa da  $E_{t0}$  em alguns meses e regiões, embora com aumento de temperatura, podem estar associados à diminuição da amplitude térmica ( $T_{max}-T_{min}$ ), o que pela equação sugerida por Hargreaves e Samani (1985) contribui para diminuir a  $E_{t0}$ .

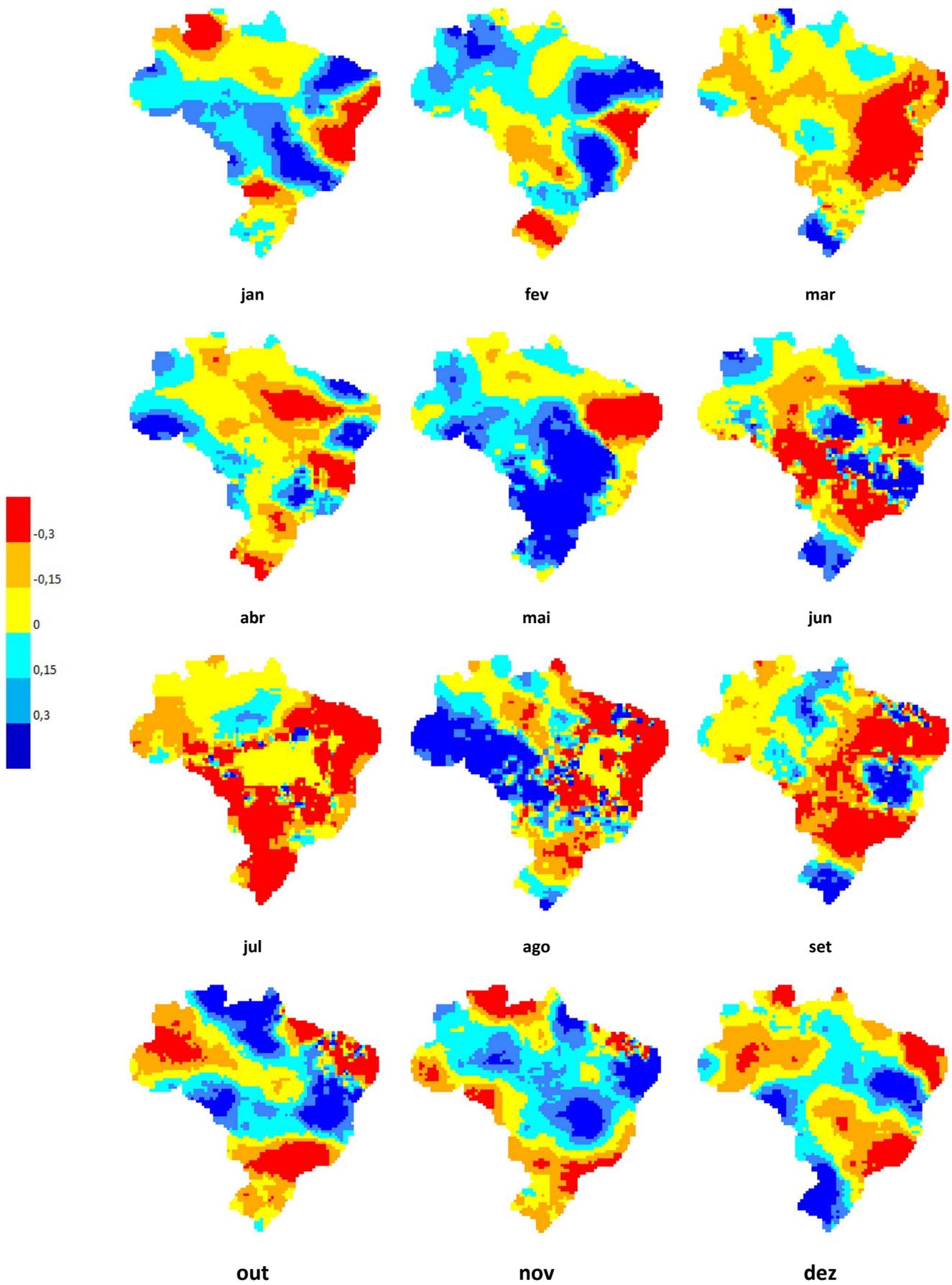


Figura 3 – Anomalia mensal da Ptot em 2040 para o cenário de clima futuro bccsm11\_rcp85 (crítico).

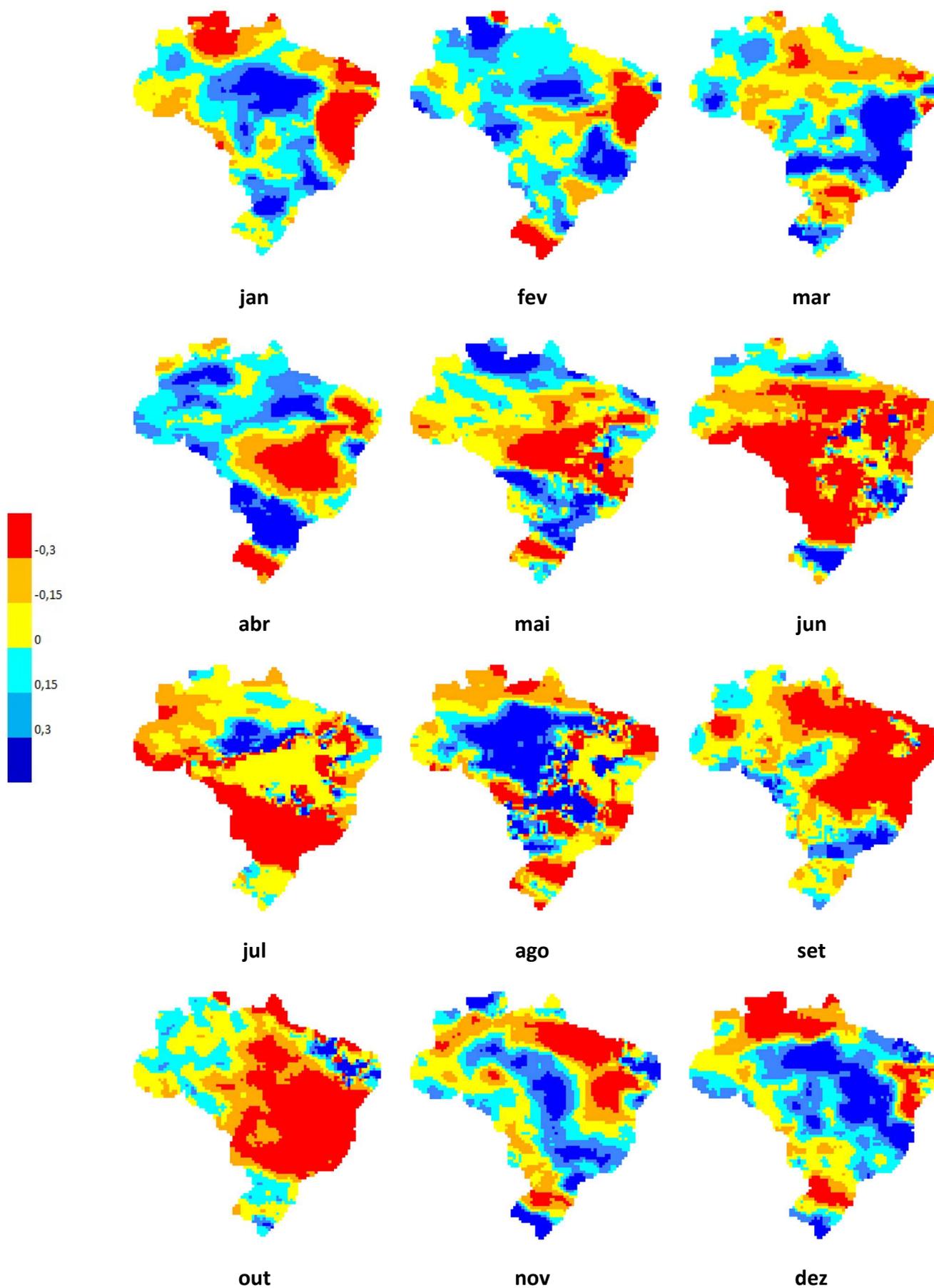


Figura 4 – Anomalia mensal da Ptot em 2040 para o cenário de clima futuro CCSM4\_rcp85 (intermediário).

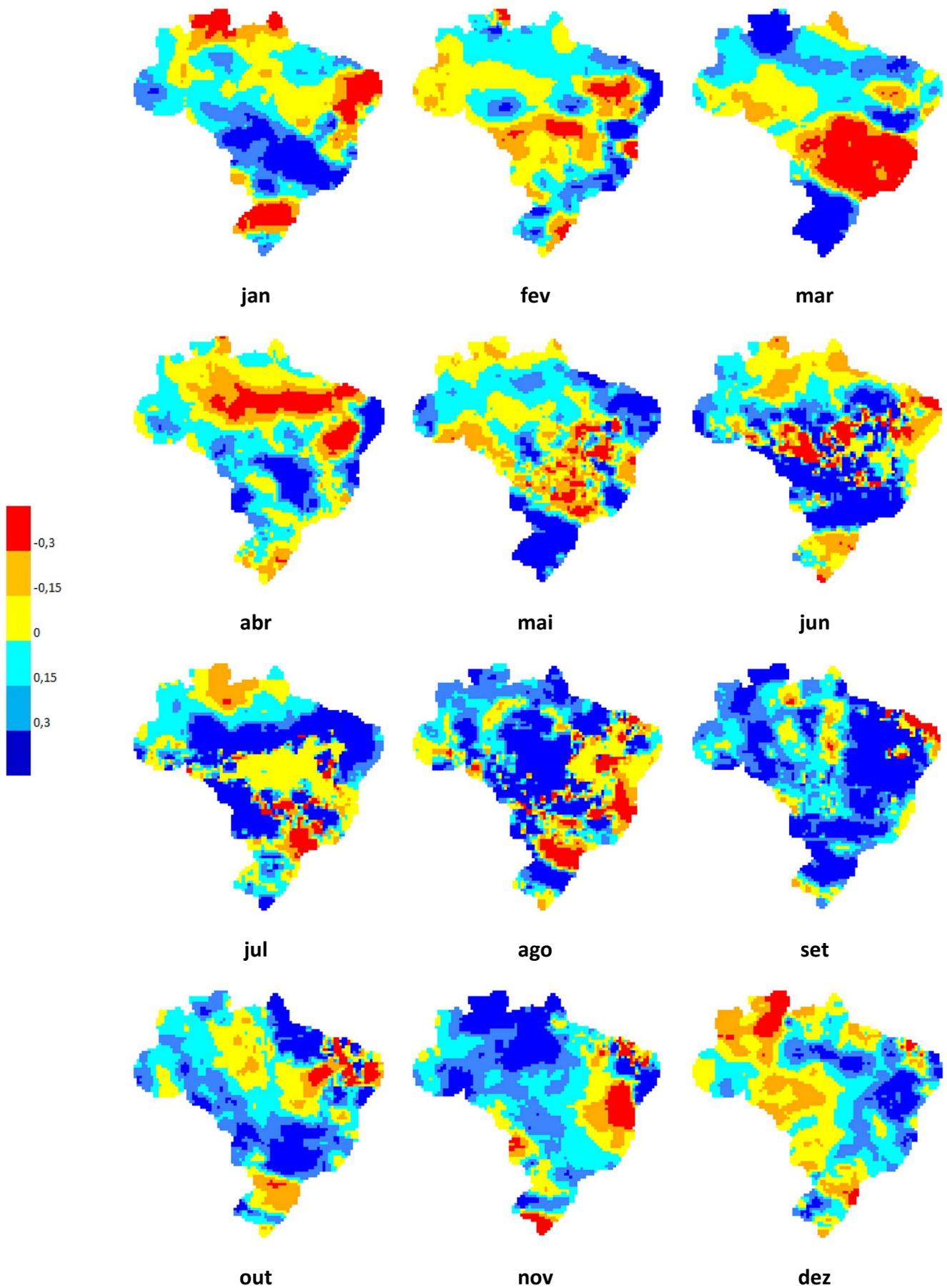


Figura 5 – Anomalia mensal da Ptot em 2040 para o cenário de clima futuro CNRMCM5\_rcp45 (otimista).

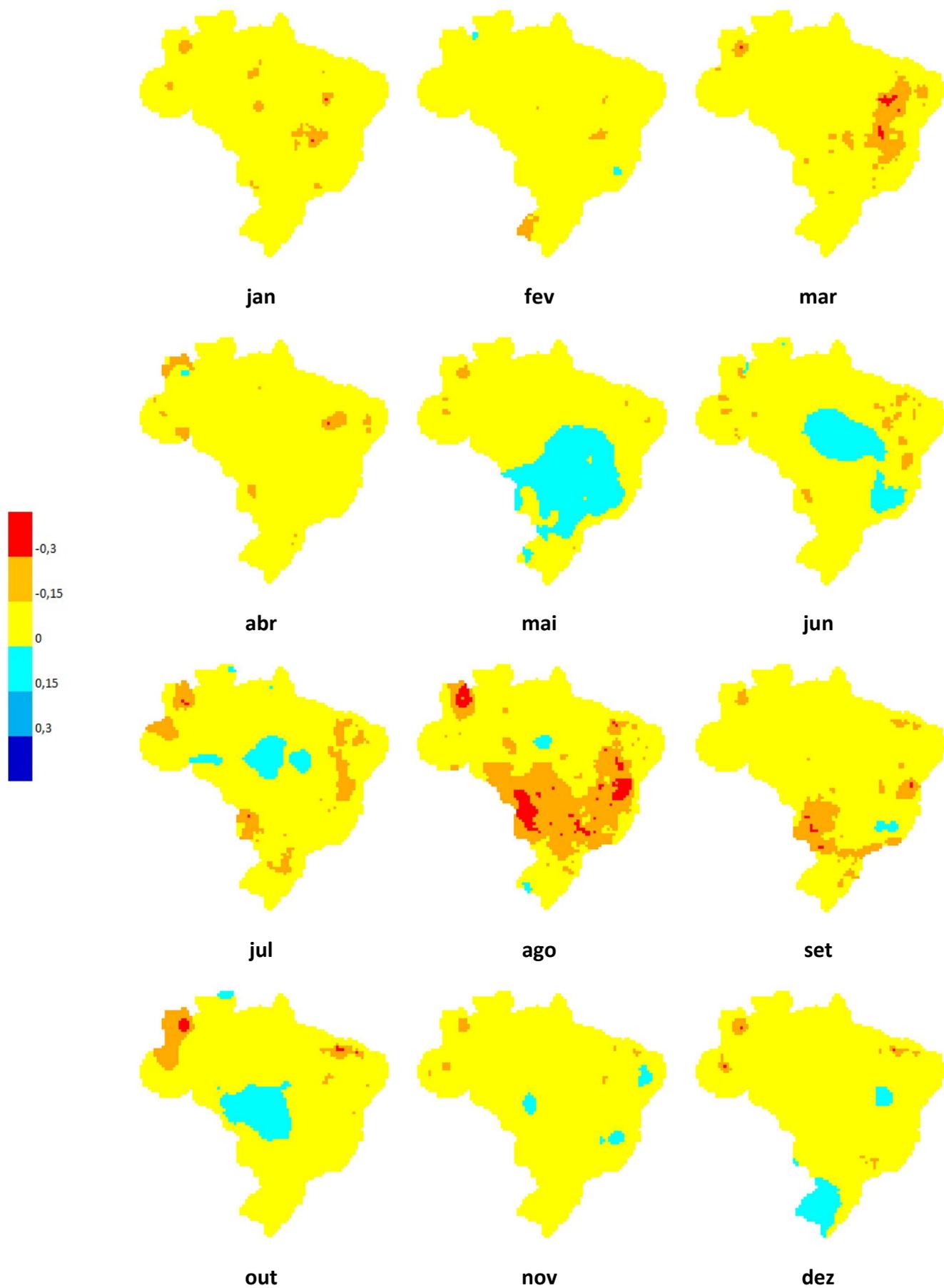


Figura 6 – Anomalia mensal da Et0 em 2040 para o cenário de clima futuro bccsm11\_rcp85 (crítico).

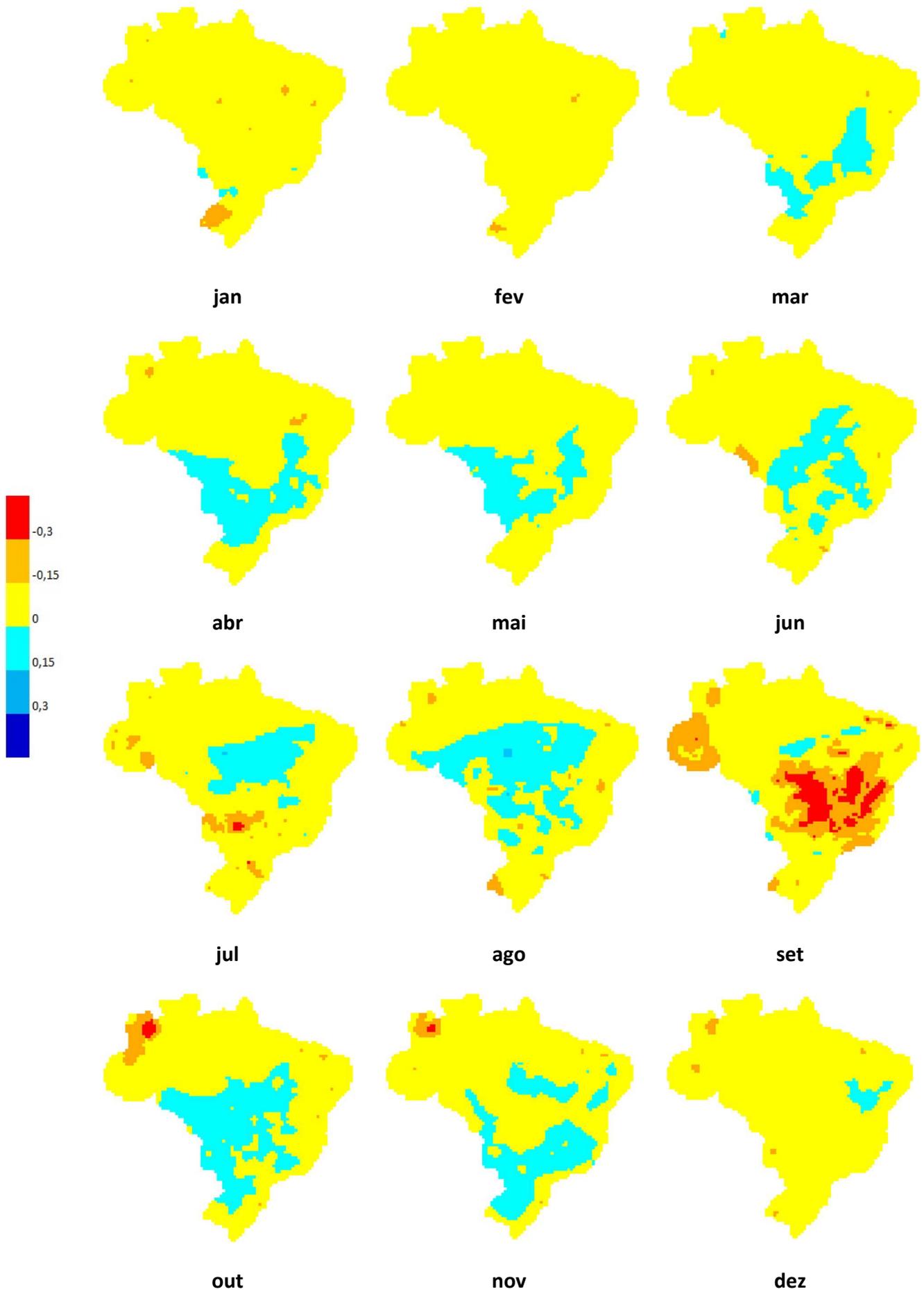


Figura 7 – Anomalia mensal da Et0 em 2040 para o cenário de clima futuro CCSM4\_rcp85 (intermediário).



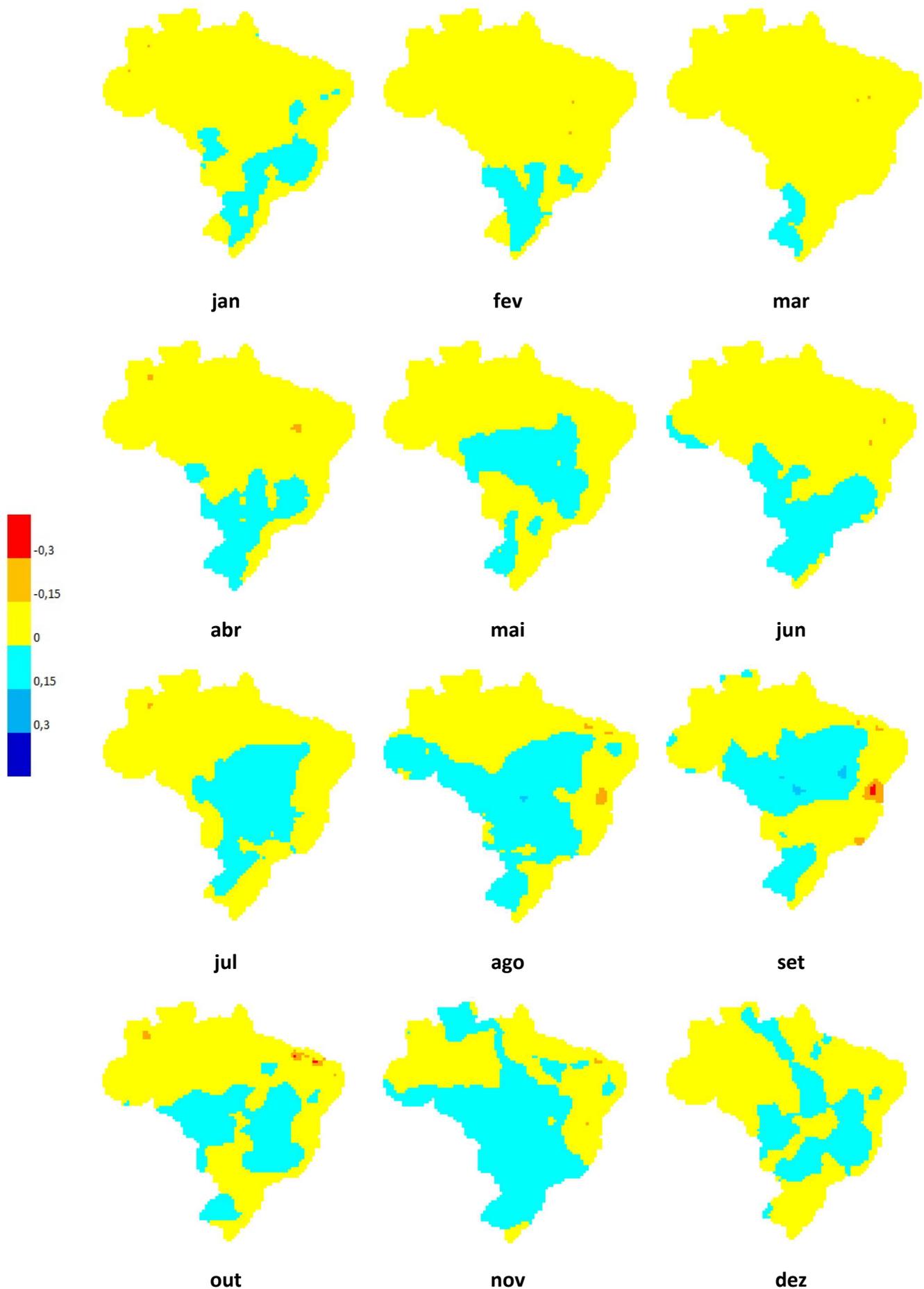


Figura 8 – Anomalia mensal da Et0 em 2040 para o cenário de clima futuro CNRMCM5\_rcp45 (otimista).



## Demanda de Irrigação em 2040

80. O cálculo da demanda de irrigação é complexo – envolve dezenas de variáveis, constantes e equações que simulam o balanço hídrico de água no solo. O déficit (água necessária que não pode ser suprida pelo ambiente), somado às perdas dos sistemas, resultam em uma necessidade de irrigação específica de cada cultura naquele local e período do ano, ou seja, no volume de água a ser aplicado para o pleno desenvolvimento das lavouras. Essas lâminas de irrigação são então multiplicadas pela área irrigada. A metodologia adotada pela ANA encontra-se detalhada no Manual de Usos Consuntivos da Água (ANA, 2019) e nos Coeficientes Técnicos para a Agricultura Irrigada no Brasil (ANA, 2020).

81. Para o Atlas Irrigação, as demandas hídricas médias mensais sob impacto de mudanças do clima em 2040 foram estimadas para os três cenários de referência, cujas anomalias potenciais sobre a precipitação e a evapotranspiração potencial foram detalhadas no tópico anterior. Essas anomalias foram aplicadas sobre o clima médio histórico observado até 2019. Cabe reiterar que a evapotranspiração potencial é estimada a partir da equação de Penman-Monteith e as anomalias a partir do modelo de Hargreaves já que as bases de dados não possuem variáveis suficientes.



Figura 9. Estações adotadas para gerar o clima médio mensal no Brasil.

Maiores informações: Altas Irrigação (<http://atlasirrigacao.ana.gov.br>)

82. Todas as demais variáveis de cálculo (área, culturas, calendários etc.) foram mantidos em relação à estimativa de referência, permitindo observar o quanto a demanda pode variar apenas em função de alterações do clima em relação ao clima médio observado.

83. Cabe reiterar que o cenário composto pelo modelo BCCSM11 e pelo cenário de emissão RCP8.5 é propenso a maiores aumentos da demanda de irrigação, já que resultou em menores chuvas e maiores evapotranspirações nas regiões com irrigação. O cenário intermediário CCSM4-RCP8.5 sinaliza menores chuvas que o cenário BCCSM11-RCP8.5, no entanto, há uma mudança menos intensa na evapotranspiração. Já o cenário CNRMCM5-RCP4.5 seria aquele considerado otimista sob o ponto de vista da irrigação, pois estima chuvas mais favoráveis e aumentos sutis de evapotranspiração.

84. Em termos de magnitude de aumento da demanda hídrica média anual, os cenários apontam entre +1% no cenário otimista a +20% no cenário crítico, sendo o aumento de +13% no cenário intermediário. Além disso, a sazonalidade é afetada em diferentes magnitudes e proporções, com aumento máximo da demanda média mensal de 254% no cenário crítico e de 186% no cenário otimista (ambos os picos ocorrem em março). Já no cenário intermediário, a máxima variação mensal foi verificada em janeiro (+148%).

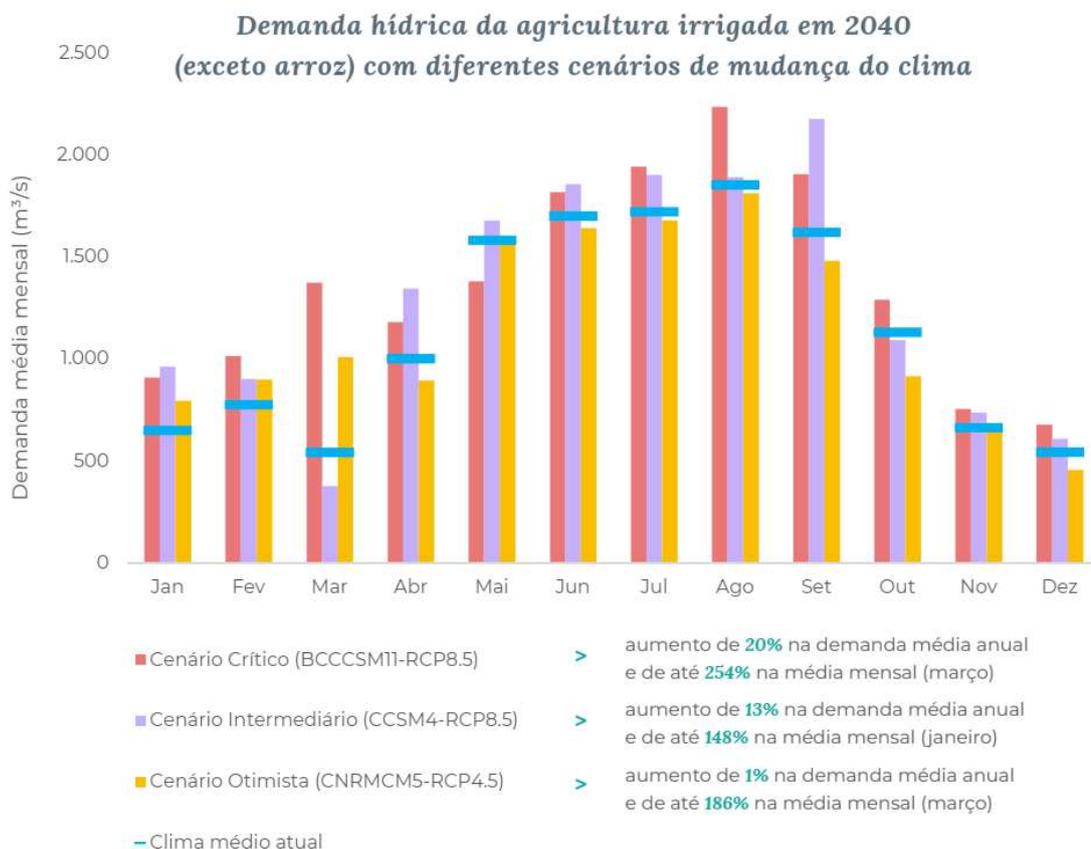


Figura 10. Comparativo das demandas hídricas mensais com o clima atual e com os três cenários de mudança do clima em 2040.

85. Estudo recente da ANA e do IBGE no âmbito das Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil demonstrou que a agricultura brasileira consome 10 mil m<sup>3</sup> de água por segundo (média anual 2013-2017). Entretanto, 92,5% desse volume advém do ciclo hidrológico local (água verde, do ambiente) e apenas 7,5% é aportado complementarmente via irrigação (água azul). Considerando a separação nas tipologias sequeiro e irrigada, a agricultura de sequeiro consumiu, em média, 82% da água, enquanto as áreas irrigadas consumiram 18% (10,5% do ambiente e 7,5% via irrigação) (ANA & IBGE, 2020).

86. Esses dados, detalhados na Figura 11 por ano analisado, demonstram, por um lado, a elevada dependência da agricultura brasileira pela água disponível no ambiente, o que a torna mais vulnerável às mudanças do clima. Por outro, um grande espaço para o crescimento da irrigação como medida mitigadora, convertendo áreas de sequeiro.

87. Pelo exposto, conclui-se que a dependência da agricultura da água azul (irrigação), que já tende a crescer uma vez que as áreas irrigadas se expandem em taxas superiores às de sequeiro, deve aumentar com mudanças do clima pelo efeito combinado de diminuição de água do ambiente e de aumento dos riscos à produção de sequeiro.

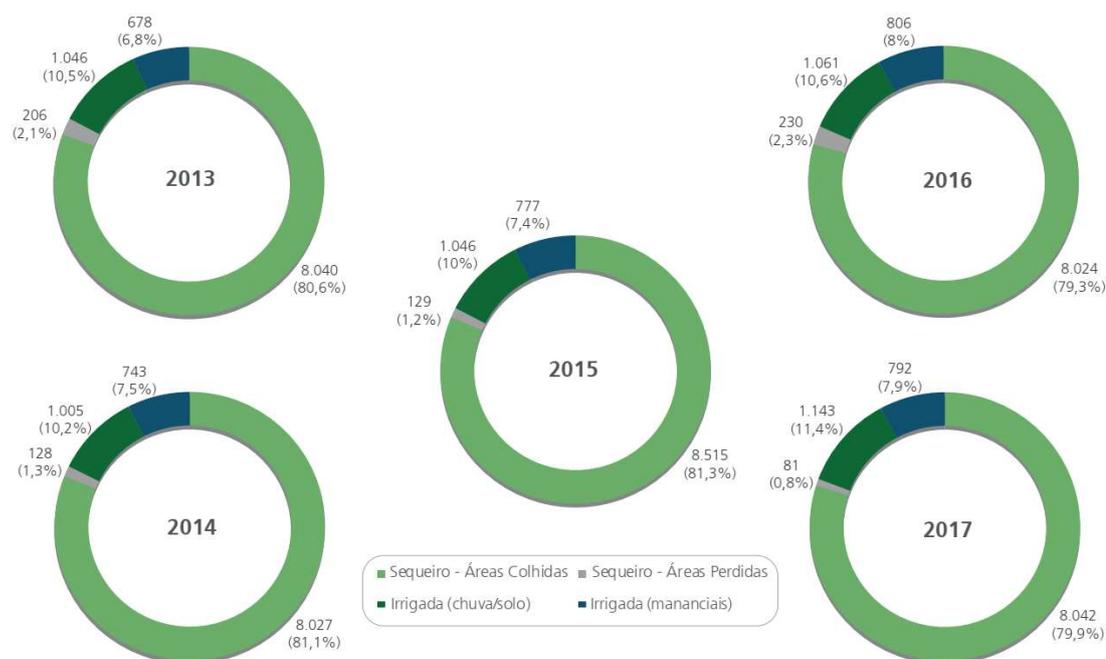


Figura 11. Síntese do consumo de água pela agricultura de sequeiro e irrigada no Brasil (m³/s) - 2013-2017.

Fonte: ANA & IBGE (2020).

## VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

88. Pesquisas têm demonstrado cada vez mais a estreita relação entre as atividades antrópicas e a mudança global do clima e, mesmo nos cenários mais otimistas, são esperados efeitos, em diferentes níveis, por todo o planeta. O setor agrícola – fortemente dependente de fatores climáticos – é um dos mais vulneráveis a serem impactados pelas mudanças climáticas, principalmente nos países em desenvolvimento. Nesse contexto, a irrigação é um importante instrumento a ser empregado na adaptação às condições mais adversas do clima, mas é também impactada por essas mudanças com o aumento potencial da necessidade de irrigação.

89. Este estudo apresentou uma avaliação do impacto das mudanças climáticas na demanda de irrigação no Brasil a partir da seleção de cenários de clima futuros. Os resultados aqui apresentados fornecem relevantes informações para o processo de tomada de decisão e o desenvolvimento de políticas públicas no setor agrícola. Isso é fundamental para a elaboração de estratégias de adaptação da agricultura irrigada às mudanças potenciais do clima.

90. As anomalias de evapotranspiração potencial e precipitação nos cenários de referência apontam para mudanças importantes na geografia do clima no Brasil em 2040, com tendência de impactos negativos sobre a agricultura: na irrigada, uma tendência de aumento anual e, principalmente, sazonal da necessidade de irrigação, levando a uma diminuição do aproveitamento de água do ambiente (água verde) e aumento da complementação hídrica (água azul); e na de sequeiro, um agravamento das condições de produção em muitas regiões produtoras, indicando aumento da escassez hídrica na 1ª safra e até mesmo a inviabilização da 2ª safra, o que poderá levar a uma corrida adicional para a conversão de áreas de sequeiro em irrigadas.

91. Com isso, a atual perspectiva de expansão da agricultura irrigada em 200 a 300 mil hectares ao ano, gerando uma pressão adicional de captação de água bruta de 2 a 3 trilhões de litros ao ano, poderá se intensificar com as mudanças do clima. Os conflitos poderão aumentar caso essas mudanças também levem à diminuição da disponibilidade hídrica dos mananciais e ao aumento de outros usos da água nas mesmas bacias hidrográficas.

92. A abordagem aplicada no Atlas Irrigação, detalhada nesta Nota, parte de uma visão onde se reconhece a incerteza advinda da impossibilidade estrutural de se prever de forma determinística o futuro e de controlá-lo, incerteza esta que pode ser traduzida em cenários que informam futuros potenciais (críveis-verossímeis com o conhecimento atual), e que demandam estratégias de adaptação que proporcionem ao setor da agricultura irrigada flexibilidade para operar de forma persistente (eficaz) nos diferentes futuros potenciais alternativos.

93. As questões e incertezas intrínsecas às estimativas de mudanças do clima diminuem à medida que essas mudanças se tornam mais palpáveis, imediatas ou visíveis. Dezenas de modelos simulados já convergem para potenciais impactos negativos na irrigação brasileira em 2040 – horizonte esse que é de curto prazo para análises climáticas e que já atinge o horizonte de investimentos feitos atualmente.

94. Por fim, é importante lembrar que o desenvolvimento dessas estratégias de adaptação tem que ser amparado por políticas públicas inovadoras, capazes de criar as circunstâncias necessárias ao enfrentamento das consequências das mudanças climáticas, numa perspectiva de longo prazo e numa abordagem baseada na construção de sistemas de aprendizagem para ação em situações de complexidade e incerteza. O conjunto de informações produzidos nesse estudo, além de orientar os tomadores de decisão e formuladores das políticas públicas, permitirá também contribuir na construção desse sistema.

95. As análises aqui apresentadas também constarão no Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040, que se encontra em elaboração, podendo orientar diretrizes, estratégias e ações que serão detalhadas no Plano.

Atenciosamente,

(assinado eletronicamente)  
MARCO VINÍCIUS CASTRO GONÇALVES  
Especialista em Regulação de Recursos  
Hídricos e Saneamento Básico

(assinado eletronicamente)  
DANIEL ASSUMPÇÃO COSTA FERREIRA  
Especialista em Geoprocessamento

(assinado eletronicamente)  
SAULO AIRES DE SOUZA  
Coordenador de Estudos Hidrológicos

(assinado eletronicamente)  
THIAGO HENRIQUES FONTENELLE  
Coordenador de Estudos Setoriais

De acordo. Encaminhar vias da NT à SRE, à SIP e à GGES para conhecimento.

(assinado eletronicamente)  
FLÁVIO HADLER TROGER  
Superintendente de Planejamento de Recursos Hídricos

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas (Brasil). Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande – PIRH-Grande: resumo executivo / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2018. 95 p.: il.
- Agência Nacional de Águas (Brasil). Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: ANA, 2019.
- Agência Nacional de Águas (Brasil); IBGE. Uso da água na agricultura de sequeiro no Brasil (2013-2017). Brasília: ANA, 2020.
- Angelotti, F. Mudanças climáticas e problemas fitossanitários. In: LIMA, R. da C. C.; CAVALCANTE, A. de M. B.; MARIN, A. M. P. Desertificação e mudanças climáticas no Semiárido brasileiro. Campina Grande: INSA, 2011. cap. 8, p. 147-160. Biblioteca(s): Embrapa Semiárido.
- Araújo, P.H.C., Silva, F.F., Gomes, M.F.M., Féres, J.G., Braga, M.J., 2014. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região Nordeste do Brasil [in portuguese]. *Revista de Economia do Nordeste* 45, 46–57.
- Assad, E. D.; Martins, S. C.; Beltrão, N. E. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 48, n. 1, p. 1-8, 2013a.
- Assad, E.D., Pinto, H.S., Nassar, A., Harfuch, L., Freitas, S., Farinelli, B., Lundell, M., Bachion, L.C., Fernandes, E.C.M., 2013b. Impactos das Mudanças Climáticas na Produção Agrícola Brasileira [in Portuguese]. Technical Report. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento.
- Assad, E.D., Oliveira, A.F., Nakai, A.M., Pavão, E., Pellegrino, G., Monteiro, J.E., 2016. Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas [in portuguese]. In: Teixeira, B.S., Orsini, J.A.M., Cruz, M.R. (Eds.), *Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, pp. 127–187 chapter 4.
- Asadieh, B.; Krakauer, N. Y. Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrology Earth System Sciences*, 19, 877–891, 2015.
- Avila-Diaz, A.; Abrahão, G.; Justino, F.; Torres, F.; Wilson, A. Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. *Climate Dynamics* (2020a) 54:5065–5088 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05272-9>
- Avila-Diaz, A.; Benezoli, V.; Justino, F.; Torres, F.; Wilson, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics* (2020b) 55:1403–1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- Bárdossy, A.; Pegram, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*. Volume 47, Issue 4, 2011.
- Betts, R.A., et al., 2007. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature* 448 (7157), 1037e1041. Nature Publishing Group.
- Carvalho, A.L., Menezes, R.S.C., Nóbrega, R.S., Pinto, A.S., Ometto, J.P.H.B., von Randow, C., Giarolla, A., 2015. Impact of climate changes on potential sugar cane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renew. Energy* 78, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.023>.
- Chou, S.C., Silva, A., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Rodrigues, D., Campos, D., 2016. Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul. In: Teixeira, B.S., Orsini, J.A.M., Cruz, M.R. (Eds.), *Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, pp. 49–90 chapter 2.
- Cortez, B. C. Precipitações Extremas Em Condições Não Estacionárias Para Cenários De Mudanças Climáticas no Brasil. Dissertação de Mestrado Submetida à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. Universidade Federal de Viçosa. 2020.
- Costa, L.C., Justino, F., Oliveira, L., Sedyama, G.C., Ferreira, W.P.M., Lemos, C.F., 2009. Potential forcing of CO<sub>2</sub>, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in Southeast Brazil. *Environ. Res. Lett.* 4, 014013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>.
- Doll, P. (2002). Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective. *Climatic Change*, 54(3), 269–293.

- Feres, J., Reis, E.J., Speranza, J.S., 2010. Climate change, land use patterns and deforestation in Brazil. Fourth World Congress of Environmental and Resource Economists.
- Groves, D. G., Lempert, R. J. 2007. A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change*, 17, 73-85.
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., et al. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351–370.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Konzmann, M., Gerten, D., & Heinke, J. (2013). Climate impacts on global irrigation requirements under 19 GCMs, simulated with a vegetation and hydrology model. *Hydrological Sciences Journal*, 58(1), 88–105.
- Lapola, D.M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Msangi, S., Priess, J.A., Silvestrini, R., Soares-Filho, B.S., 2011. Impacts of climate change and the end of deforestation on land use in the Brazilian Legal Amazon. *Earth Interact.* 15, 1–29. <https://doi.org/10.1175/2010EI333.1>.
- Margulis, S., Dubeux, C.B.S., Marcovitch, J., 2011. *The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities*. FEA/USP, São Paulo.
- Marin, F.R., Jones, J.W., Singels, A., Royce, F., Assad, E.D., Pellegrino, G.Q., Justino, F., 2013. Climate change impacts on sugar cane attainable yield in southern Brazil. *Clim. Chang.* 117, 227–239. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0561-y>.
- McGrath, J. M., & Lobell, D. B. (2013a). Regional disparities in the CO2 fertilization effect and implications for crop yields. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014054.
- Menezes, L.S. et al. *Mudanças climáticas no DF e Ride: detecção e projeções das mudanças climáticas para o Distrito Federal e região integrada de desenvolvimento do DF e entorno*. Brasília, Secretaria do Meio Ambiente. 192 p. 2016.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima – Estratégia Geral/ Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudança do Clima e Florestas*. – Brasília, DF: MMA, 2016.
- NEXGDDP - NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections. Technical Note. Junho, 2015 (Disponível em: [https://cds.nccs.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/NEX-GDDP\\_Tech\\_Note\\_v1\\_08June2015.pdf](https://cds.nccs.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/NEX-GDDP_Tech_Note_v1_08June2015.pdf)).
- Parson, E. A. 2008. Useful Global Change Scenarios: Current Issues and Challenges. *Environmental Research Letters*, 3, 045016.
- Prudhomme, C., Reynard, N., Crooks, S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: Where are we now? *Hydrological Processes* 16: 1137–1150.