



Pegada hídrica da soja em cenários de mudanças climáticas na última fronteira agrícola do Cerrado nas regiões Norte e Nordeste

João Francisco Severo Santos^{1(*)}, Liliana Pena Naval², Danuza Francisco Costa Leite¹, Danilo Ribeiro Barbacena¹ e Fernanda Alves Silva Severo²

¹Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Unidade Estadual do IBGE no Tocantins (UE/TO). Quadra 401 Sul, Av. Joaquim Teotônio Segurado, Lt 17, ed. Gold Star 1º piso - Plano Diretor Sul, CEP 77015-550, Palmas, TO.

E-mail: coesuft@gmail.com, danuza.leite@ibge.gov.br e danilo.barbacena@ibge.gov.br

²Universidade Federal do Tocantins. Quadra 109 Norte, Av. NS-15, s/n, Plano Diretor Norte, CEP 77001-090 Palmas, TO.

E-mail: liliana@uft.edu.br e fernanda.agroambiental@gmail.com

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 27 de setembro de 2019

Aceito em 4 de março de 2020

Termos para indexação:

recursos hídricos

agricultura

mudanças climáticas

Glycine max (L.) Merrill

RESUMO

A Pegada Hídrica – PH é um indicador que quantifica e mapeia o consumo de água de produtos e modelos de produção. A produção de soja no Cerrado utiliza grandes quantidades de água e envolve supressão da vegetação nativa, o que pode provocar e/ou intensificar as mudanças climáticas locais. O objetivo desse estudo foi analisar a PH da produção de soja no Cerrado dos estados das regiões Norte e Nordeste diante de dois cenários futuros. Para isso, os cenários otimista e pessimista foram utilizados gerar dados climáticos no simulador Marksin-GCM 3.2, a fim de serem inseridos no modelo Aquacrop 5.0 para estimar o rendimento da soja nas safras de 2050 e 2080, bem como sua PH. Os resultados revelaram não haver diferenças significativas entre a média da PH relativa (m³/t) do período 1999-2018 e qualquer cenário futuro. Todavia, a PH absoluta (km³) apresentou aumentos significativos em todos os cenários devido a tendência de expansão das áreas de cultivo. Assim, se as tendências se mantiverem, a PH da produção de soja aumentará de 9,59 km³, em 2018, para até 37,46 km³ (cenário pessimista em 2080).

© 2020 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

O cultivo de soja no Cerrado exige processos de mudança de cobertura e composição química dos solos. Assim, o avanço do cultivo só é possível por meio da remoção da mata nativa, queimada dos resíduos do desmatamento, redução da acidez do solo por meio de aplicação de calcário e

gesso agrícola, além da fertilização intensiva com potássio, fósforo e nitrogênio (Curado *et al.*, 2014; Nunes *et al.*, 2011). Além disso, de acordo com Nunes *et al.* (2016), a produção agrícola é muito dependente de fatores naturais como precipitação, umidade do solo, evaporação, absorção e transpiração de água pelos cultivares.

No Cerrado, o ciclo das águas e as temperaturas são fortemente influenciados pelas características da vegetação,

pois a maioria das árvores e arbustos desse bioma apresenta raízes profundas para explorar água do subsolo na estação seca e reabastecer os reservatórios subterrâneos na estação chuvosa. Além disso, a dispersão vertical e horizontal das raízes promove um maior tempo de residência da umidade e controle da temperatura do solo na estação seca. Dessa forma, o equilíbrio desse sistema de reabastecimento e controle de temperatura pode estar ameaçado pela substituição da vegetação nativa por cultivos de soja (IMAFLOA, 2018; Strassburg *et al.*, 2017; Lahsen *et al.*, 2016; Ayala *et al.*, 2016; Curado *et al.*, 2014).

A disponibilidade de água no futuro pode ser estimada por modelos que projetam cenários integradores de informações demográficas, econômicas, climáticas e de usos e cobertura dos solos (Mach *et al.*, 2016). Os cenários futuros podem ser definidos como um conjunto de características plausíveis a longo prazo, que são úteis no apoio à tomada de decisões sob ambientes de profunda incerteza. Apesar da crescente aceitação da importância dos cenários nos campos da pesquisa científica, seu potencial ainda não foi adequadamente aproveitado para aumentar o conhecimento sobre os riscos induzidos pelas mudanças climáticas globais. Nesse sentido, a elaboração de cenários pode reduzir o abismo de entendimento entre cientistas, gestores de recursos hídricos e tomadores de decisão nas esferas pública e privada (Kantenbacher *et al.*, 2018; Thissen *et al.*, 2017).

Os estudos baseados em cenários demonstram consistentemente que as mudanças demográficas, econômicas e climáticas podem resultar em diminuição da recarga de água subterrânea (Mach *et al.*, 2016) e disponibilidade de água superficial (Schewe *et al.*, 2014), agravamento da escassez sazonal de água nas principais bacias hidrográficas do planeta (Hoekstra, 2017) e aumento da necessidade de irrigação na agricultura devido elevação das temperaturas e das irregularidades temporais e espaciais das chuvas (Leng *et al.*, 2015; Orłowsky *et al.*, 2014). Nesse contexto, os resultados de estudos de cenários futuros de mudanças climáticas devem deixar claro o espectro de incertezas dessas projeções. Thissen *et al.* (2017) argumenta que as incertezas são subestimadas quando uma decisão política é urgente ou superenfaticada quando tal decisão necessita ser adiada.

No sentido de auxiliar a tomada de decisões no campo da gestão de recursos hídricos, a Pegada Hídrica apresenta-se como uma importante ferramenta (Hoekstra, 2016). Trata-se de um indicador do uso da água, cujo método possibilita quantificar e mapear o impacto do consumo humano sobre os recursos hídricos em todas as fases da cadeia produtiva, além de avaliar a sustentabilidade dos modelos de produção (Porkka *et al.*, 2016). Considerando que a agricultura é simultaneamente fonte significativa de alterações climáticas e uma das atividades mais vulneráveis aos seus impactos (O'Neill *et al.*, 2017; Arbuckle *et al.*, 2013), o objetivo desse estudo foi analisar a Pegada Hídrica da pro-

dução de soja no Cerrado dos estados das Regiões Norte e Nordeste do Brasil diante cenários de mudanças climáticas para as safras de 2050 e 2080.

Materiais e Métodos

A delimitação territorial desse estudo compreende parte dos estados da Bahia, Maranhão, Piauí e Tocantins, região denominada de MATOPIBA (Figura 1) e abrange uma área total de 73.173.485 hectares localizados nas coordenadas geográficas de latitudes 12°51'39"S e 1°04'15"W e longitudes 46°02'34"S e 39°39'48"W. Essa área inclui 337 municípios e um universo de aproximadamente de 324 mil estabelecimentos agrícolas segundo proposto por Miranda *et al.* (2014).

Os dados de precipitação, temperatura e incidência radioativa diária foram gerados no simulador meteorológico estocástico MarkSim-GCM (Jones e Thornton, 2013), cuja referência climática é uma representação média do período 1961-1990. Empregou-se *downscaling* temporal e espacial, com resolução de aproximadamente 50 km. As variáveis foram geradas a partir de dois dos 17 modelos incorporados no pacote do aplicativo MarkSim-GCM. A escolha dos modelos ocorreu por meio de um processo de validação concorrente de curto prazo, onde as estimativas dos 17 modelos foram comparadas com os dados observados de 26 estações meteorológicas do INMET, localizadas na área de estudo no período de 2010 a 2018. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio da análise de correlação e teste t independente, bem como pelo índice de concordância de Willmott (d) (Willmott *et al.*, 2012) e pelo erro médio absoluto (EMA).

Conforme os resultados do processo de validação (Santos *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2017), o modelo HadGEM2-ES, com resolução de 1.2414°x1.875° (Jones *et al.*, 2011), foi escolhido para gerar os dados de temperatura e incidência radioativa diária, uma vez que seus resultados de desempenho expressam alta correlação, dependência e concordância entre os dados observados e estimados no processo de validação (Tabela 1). O MIROC5, com resolução de 1.4063° quadrados (Watanabe *et al.*, 2010), foi selecionado para gerar dados de precipitação diária devido ao seu desempenho superior nessa variável (Tabela 1).

A construção dos cenários futuros foi realizada por meio dos Caminhos Representativos de Concentrações (RCPs) de gases de efeito estufa (GEE), que indicam forçantes radiativas de interesse para os estudos do IPCC até 2100 (IPCC, 2014). O cenário RCP 8.5, cuja concentração de equivalentes CO₂ ultrapassa 1.370 ppm e a forçante radiativa é superior a 8,5 W/m², representa o mais pessimista. Já o RCP 4.5 em que o forçamento radiativo ficará em torno de 4,5 W/m² e a concentração de equivalentes de CO₂ atingirá aproximadamente 650 ppm antes de 2100 para depois

Figura 1. Mapa da área de estudo.
Fonte: Vilpert (2016)

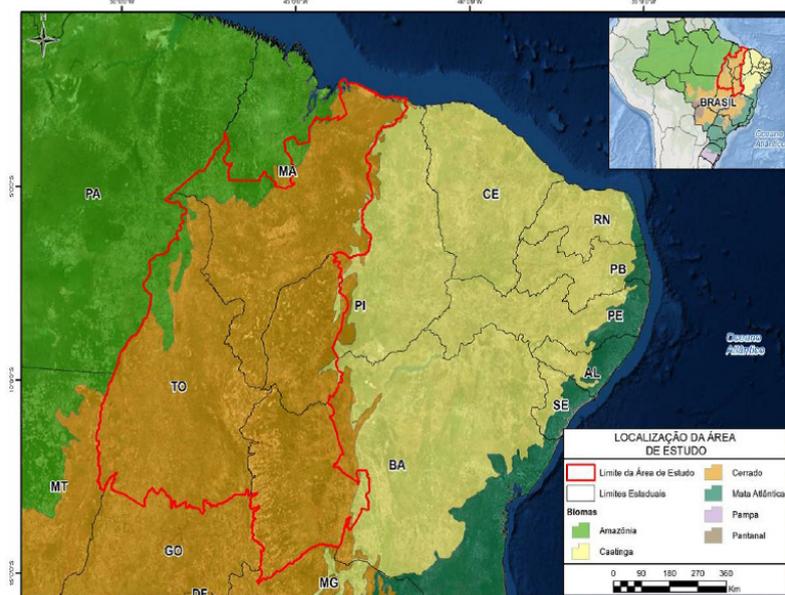


Tabela 1. Desempenho dos modelos para estimar precipitação total e temperaturas médias.

| Modelo | Variável | R | t | d | EMA |
|------------|--------------|------|------|------|-------|
| HadGEM2-ES | Precipitação | 0,44 | 5,42 | 0,44 | 33,52 |
| HadGEM2-ES | Temperatura | 0,88 | 0,47 | 0,89 | 0,15 |
| MIROC5 | Precipitação | 0,85 | 0,21 | 0,84 | 1,95 |
| MIROC5 | Temperatura | 0,38 | 3,41 | 0,49 | 1,05 |

declinar, configura o cenário de estabilidade dos padrões atuais de emissões de GEE (Kassie *et al.*, 2015).

O clima futuro foi projetado em escalas temporais de médio (2049 e 2050) e longo prazo (2079 e 2080), de acordo com os meses específicos que compõem a safra de soja e conforme uma aproximação do calendário agrícola atual da cultura na região. As simulações das safras futuras e número de dias decorridos do plantio a colheita, bem como o rendimento médio, foram realizadas por meio do modelo AQUACROP, onde cinco componentes principais de disponibilidade hídrica são empregados: fenologia/desenvolvimento, cobertura do dossel, profundidade de enraizamento, produção de biomassa e rendimento (FAO, 2010).

A calibração e validação do AQUACROP para simulação da produtividade da soja para o período atual (1999 - 2018) e futuro, de médio (2049/2050) e longo prazo (2079/2080), considerando mudanças climáticas dos cenários RCP 4.5 e 8.5 executados nos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, foram realizadas por Silva *et al.* (2018) e Silva (2018), sendo empregados nesse estudo.

A semeadura da cultura foi programada para início de novembro de um ano e a colheita para o final de fevereiro do outro ano. Esses períodos foram selecionados para refletir a média do calendário agrícola usual dos quatro estados que contêm a região de estudo, bem como a na-

tureza estocástica do clima e do rendimento da cultura de soja para cada cenário particular de mudança climática em simulações de 32 e 62 anos, a partir da safra de 2018.

A Pegada Hídrica (PH) da produção de soja foi estimada conforme o método descrito por Mekonnen e Hoekstra (2011), empregando-se três categorias representadas pelas cores verde, azul e cinza. Como a evapotranspiração é a variável mais importante para estimar a PH, o método Hargreaves (Hargreaves e Samani, 1974) foi empregado para isso, conforme os dados de temperatura, precipitação e insolação dos diferentes cenários futuros. Além disso, estimativas do AQUACROP para rendimento médio da produção futura de soja foram aplicadas na Equação 1, para calcular a PH verde - PHV da soja.

$$PHV (m^3 / t) = [(10 \sum_{d=1}^{dpc} Etc / Rend)] + AIP \quad (Eq. 1)$$

Onde: dpc = duração do período de crescimento do cultivar (dias); d = dia do plantio; Etc = evapotranspiração da cultura; Rend = Rendimento médio e AIP = água incorporada ao produto no dia da colheita.

O cálculo da PH azul - PHA foi similar ao da PH verde, porém adotou-se o déficit hídrico para atingir a produtividade estimada pelo modelo AQUACROP nos diferentes cenários futuros de mudanças climáticas. Assim, assumiu-se

que, se a ETC for menor ou igual a Precipitação efetiva, a PHA será nula. Toda via, se a ETC for maior que a Precipitação efetiva, o saldo hídrico (SH) será negativo e considerar-se-á que haverá déficit hídrico (DH) a ser sanado com irrigação. Consequentemente, a PHA será diferente de zero (García Morillo *et al.*, 2015), conforme a equação 2.

$$PHA (m^3/t) = [(10 \sum_{d=1}^{dpc} Etc - Pref / Rend)] + AIP$$

(Eq. 2)

Onde: Pref = Precipitação efetiva.

A PH cinza - PHC expressa a poluição das águas em termos de volume necessário para diluir os efluentes a ponto de torná-los inofensivos à saúde da biota (Leng *et al.*, 2015; Franke *et al.*, 2013). Para o seu cálculo (Eq. 3), adotou-se a taxa de aplicação do agroquímico mais comum dessa cultura: o fósforo, cujo limiar inferior da estimativa de lixiviação foi de 10% (Franke *et al.*, 2013) e a concentração máxima admitida foi de 2,7 g/L em conformidade com a Resolução n° 357 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2005).

$$PHC (m^3/t) = \frac{FL * TAQ}{\frac{Cmax - Cnat}{Rend}}$$

(Eq. 3)

Onde: FL = fração de lixiviação; TAQ = taxa de aplicação de químicos por hectare; Cmax = concentração máxima admitida; Cnat = concentração natural do poluente.

A pegada hídrica relativa - PHR da produção de soja foi estimada pelo somatório das pegadas verde, azul e cinza, direta e indireta. Já a pegada hídrica absoluta ou total - PHT foi representada pelo produto da PHR média e a produção total estimada. A avaliação da sustentabilidade ambiental da PHT da produção de soja foi realizada a partir do

risco de déficit hídrico calculado por meio das tendências de uso da água azul (PHA) em cenários de mudanças climáticas até 2080. Assim, além da comparação com a média da PHT dos últimos 20 anos na região.

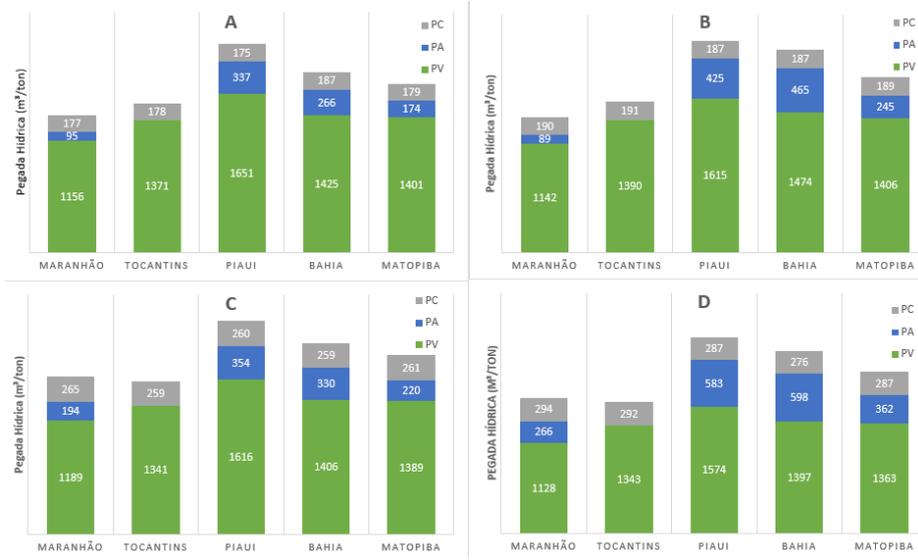
Análises de séries temporais com ajustes polinomiais, exponenciais, logarítmicos e potenciais, definidos conforme o comportamento dessas variáveis no decorrer dos últimos 20 anos, foram empregadas para determinar as tendências futuras de ocupação das áreas de plantio da soja e utilização de agroquímicos. O teste de Mann-Kendall (ZMK) foi utilizado para verificar a significância estatística das tendências analisadas. Essas análises foram realizadas por meio dos programas *Microsoft office Excel 365 versão 1708* e *PAST - Paleontological Statistics Software Package*.

A análise de variância, seguida de avaliação *pos hoc* pelo teste Tukey, foi empregada para verificar a ocorrência de diferenças significativas entre as médias das PHs relacionadas a cada unidade federativa da área de estudo. A normalidade das variáveis de área colhida, rendimento e utilização de fósforo, bem como dos resíduos da regressão dessas, foi avaliada por meio dos testes de *Shapiro-Wilk e Normal-Plot*.

Resultados e Discussão

As Pegadas Cinza e Azul serão responsáveis por aproximadamente 8% e 5% da PHR média do MATOPIBA no cenário otimista de médio prazo (Figura 2 A) e por cerca de 11% e 14% no cenário pessimista de longo prazo (Figura 2 D), respectivamente. No entanto, o comportamento dos dois componentes apresenta-se muito desigual em relação as médias estaduais. Dessa forma, o Tocantins apresentará PHA nula enquanto os demais estados apresentarão déficit hídrico em todos os cenários. O Piauí e a Bahia destacam-se pelo alto valor da PHA em todos os cenários, principalmente, no pessimista de longo prazo (Figura 2 D)

Figura 2. Componentes da PHR da produção de soja em Cenários otimistas (A e B) e pessimistas (C e D), para as safras de 2049/2050 (A e C) e 2079/2080 (B e D) conforme a unidade federativa do MATOPIBA.



Verificou-se que o componente cinza da PHR tende a crescer em todos os cenários futuros, sendo que suas diferenças são estatisticamente significativas em todas as comparações (Tabela 2). Já o componente azul, embora pareça aumentar conforme em todas as diferentes safras e cenários, suas médias apresentaram diferenças significativas apenas no cenário pessimista de longo prazo em relação ao atual e ao otimista de médio prazo. O mesmo não aconteceu com o componente verde, que representa entre 48% e 64% da PHR, conforme a localidade, safra e cenário futuro. Assim, ele foi o que mais influenciou na variabilidade temporal e espacial da PHR na área de estudo, mas não apresentou diferenças significativas em nenhum cenário. Com isso, a PHR apresentou diferenças significativas apenas no cenário pessimista de longo prazo (Tabela 2).

Tabela 2 – Análise de Variância e Teste de Tukey da Pegada Hídrica Relativa (PHR) e seus componentes verde (PHV), azul (PHA) e cinza (PHC) da produção de soja, em m³/t, nas safras de 2049/2050 e 2079/2080, em cenários otimistas (RCP 4.5) e pessimistas (RCP 8.5).

O cartograma resumido da média da PHR (Figura 3) nos estados que contém as áreas de Cerrado com recente expansão da cultura de soja revela os valores estimados para os cenários otimistas (RCP 4.5) para as safras 2049-2050 e 2079-2080, bem como dos cenários pessimistas (RCP 8.5) para as respectivas safras. Percebe-se que a menor PHR é estimada para o estado do Maranhão (1421 m³/t) no cenário otimista de longo prazo, enquanto a maior é prevista para o estado do Piauí (2404 m³/t) no cenário pessimista de longo prazo. O Tocantins é o estado com menor variabilidade entre os diferentes cenários, com uma amplitude de apenas 46 m³/t entre os diferentes cenários. Por outro lado, a Bahia é o estado que apresentará a maior amplitude da PHR entre os cenários, com até 355 m³/t, cujo valor é similar a evapotranspiração média de uma safra de soja não irrigada.

Os valores médios das projeções diante de cenários fu-

turos tendem a variar pouco na região, de cerca de 1754 m³/t a 2013 m³/t, conforme a safra e o tipo de cenário quando comparados a média de 1999-2018 (Tabela 2). Toda via, as diferenças entre os estados são evidentes e vão de 1421 m³/t no Maranhão a 2404 m³/t no Piauí (Figura 3). Embora a elevação do valor médio da PHR, no decorrer das safras, tenha sido constatada apenas cenário pessimista de longo prazo (Tabela 2), o aumento previsto para a área destinada ao plantio da soja acaba por elevar a necessidade hídrica total e, conseqüentemente, a PHT (Tabela 3).

A pesar de o rendimento futuro apresentar tendência de elevação (Tabela 3) devido a maior disponibilidade de CO₂ para o metabolismo vegetal, a sustentabilidade da produção pode ser colocada em risco, uma vez que o cultivo de soja nessas áreas é hegemonicamente sequeiro, ou seja, basicamente dependente da PHV. Nesse contexto, verificou-se que a depender do estado, do mês, da safra e do nível da forçante radioativa haverá déficit hídrico relacionado a PHV em alguns estados que contem áreas de recente expansão agrícola no Cerrado das regiões norte e nordeste (Figura 4).

A figura 4 é composta por uma seqüência de cartogramas que representam o SH trimestral das unidades federativas que contém as áreas de interesse do presente estudo, considerando os cenários otimista e pessimista. Há previsões de DH para os estados do nordeste em todos os cenários futuros, em pelo menos um dos dois trimestres produtivos. O extremo oeste da Bahia e o sul do Piauí apresentam os maiores riscos de DH, elevando a necessidade de irrigação a cada safra em ambos os cenários, uma vez que atingirão valores relativos acima de um terço da necessidade hídrica da cultura. Por outro lado, o estado do Tocantins apresentará superávit hídrico nos cenários otimistas e terá um pequeno DH apenas no primeiro trimestre de 2080 diante do cenário pessimista. Já o Maranhão apresentará DH em todas as simulações referentes ao trimestre OND, atingindo valores que superam um quarto da

Tabela 2. Análise de Variância e Teste de Tukey da Pegada Hídrica Relativa (PHR) e seus componentes verde (PHV), azul (PHA) e cinza (PHC) da produção de soja, em m³/t, nas safras de 2049/2050 e 2079/2080, em cenários otimistas (RCP 4.5) e pessimistas (RCP 8.5).

| ANOVA | PHV | PHA | PHC | PHR |
|---------------------------------|----------|--------|--------|----------|
| Média geral (m ³ /t) | 1 388,62 | 250,07 | 229,07 | 1 811,47 |
| Desvio-padrão | 190,98 | 116,06 | 5,05 | 159,60 |
| DMS*(m ³ /t) | 400,96 | 183,61 | 10,61 | 367,81 |
| CV (%) | 13,75 | 86,40 | 2,21 | 8,81 |
| Safras 99-18 | 1 408,81 | 162,67 | 150,24 | 1 579,63 |
| Safra 49-50 4.5 | 1 400,87 | 174,47 | 179,34 | 1 753,89 |
| Safra 79-80 4.5 | 1 405,04 | 244,56 | 188,83 | 1 840,51 |
| Safra 49-50 8.5 | 1 388,94 | 219,54 | 260,76 | 1 870,72 |
| Safra 79-80 8.5 | 1 362,63 | 361,70 | 287,34 | 2 012,63 |

* Diferença Mínima Significativa (p ≤ 0,05) segundo teste de Tukey, onde letras distintas nas colunas indicam diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos safras.

Figura 3 – PHR (m³/t) da produção de soja em cenários otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) para as safras de 2049-2050 e 2079-2080 de acordo o Estado que contem áreas de expansão agrícola no Cerrado.

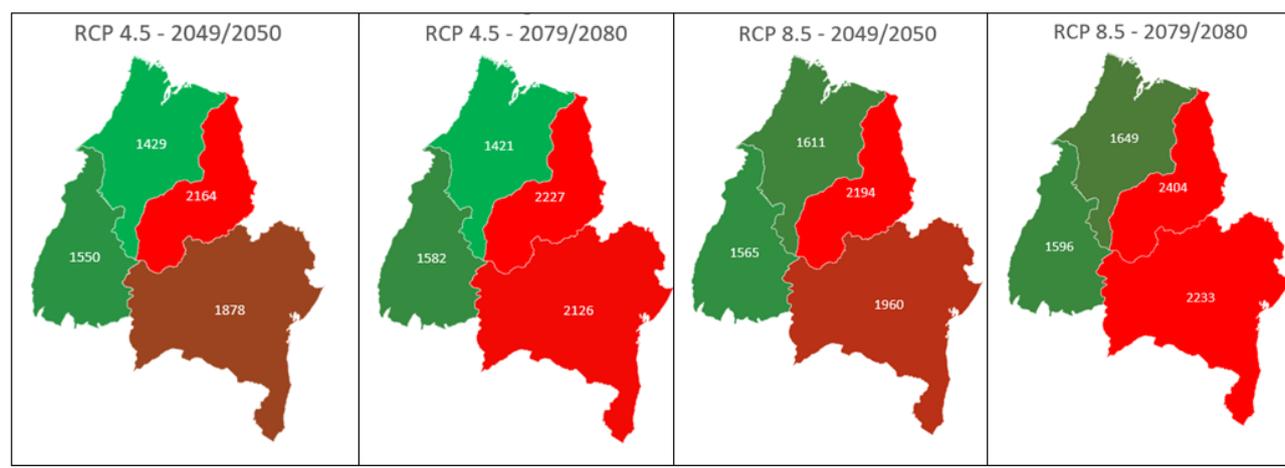


Tabela 3 – Estimativa da Demanda Hídrica média, considerando os aumentos previstos de área plantada e no rendimento do cultivo de soja conforme as safras de 2049/2050 e 2079/2080, em cenários otimistas (4.5) e pessimistas (8.5).

| Simulações | Área Plantada (ha) | Rendimento (kg/ha)* | PHT (Km ³)* |
|--------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Safra 2017-2018 | 4 127 774 | 2543,28 a | 09,59 a |
| Safra 2049-2050; RCP 4.5 | 5 800 000 | 3686,25 b | 12,96 b |
| Safra 2079-2080; RCP 4.5 | 7 500 000 | 3877,50 b | 17,59 c |
| Safra 2049-2050; RCP 8.5 | 9 400 000 | 3903,75 b | 22,33 d |
| Safra 2079-2080; RCP 8.5 | 14 500 000 | 4415,43 c | 37,46 e |

Obs.: letras diferentes na vertical indicam que há diferença estatisticamente significativa entre as médias; *p ≤ 5%.

necessidade hídrica mensal da cultura de soja na região.

Atualmente, as lavouras de soja irrigadas na região representam cerca de 1,97% do total da área destinada a esse cultivo (IBGE, 2018). Por esse motivo, essas lavouras não foram o foco desse estudo e a PHA foi concebida como a necessidade média de uso da irrigação para atingir a produtividade prevista diante da elevação de temperatura e concentração de CO₂ em toda a região analisada. Contudo, Santos (2019) relata que, nas áreas irrigadas para o cultivo de soja dessa região, a PHA aumentou de aproximadamente 1030 m³/t em 2005 para 1543 m³/t em 2016. Esse crescimento passado da PHA se reflete na abordagem prospectiva desse estudo, uma vez que, considerando seu impacto em toda a área plantada dessa região, percebe-se o aumento da necessidade de irrigação em três dos estados que abrigam essa nova fronteira agrícola (Figura 4).

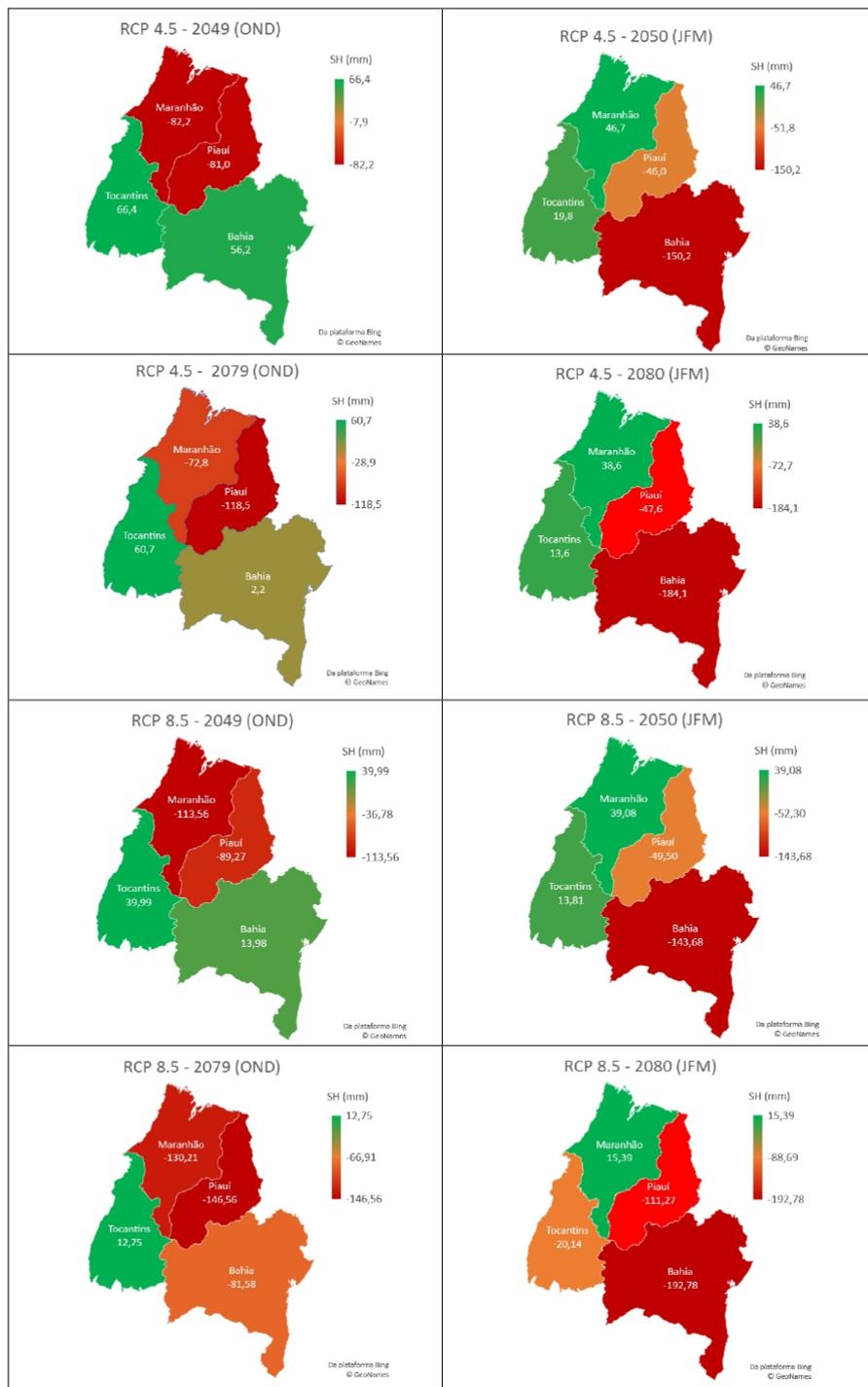
Esses achados são corroborados com o estudo de Silva (2018) que, para determinar a produtividade da soja diante dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 até 2099, constatou que a PHV decresce ao longo dos anos na proporção em que aumenta a PHA, o que indica demandas elevadas de irrigação no futuro. Isso é preocupante, pois ao contrário do Brasil, os estudos realizados na China e Europa sobre PHA demonstram que esse componente apresenta tendência a

redução nesses países devido ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de aproveitamento da água (Hogeboom *et al.*, 2018; Da Silva *et al.*, 2016; Zuo *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2015; Chapagain e Hoekstra, 2011). Embora as condições climáticas da China sejam muito diferentes das do Cerrado brasileiro, o estudo de Lu *et al.* (2016) mostrou que o uso excessivo de água na irrigação ocorreu mais por questões técnicas do que por sazonalidade e eventos climáticos.

Nesse contexto, o estado do Tocantins pode ser uma exceção, uma vez que, de acordo com os modelos e cenários analisados, não haverá déficit hídrico significativo até 2080 no cenário pessimista (Figura 4). Isso indica sustentabilidade ambiental da cultura de soja sequeira no estado, já que não haverá necessidade de aumentos substanciais nas áreas irrigadas (Figura 2), embora o calendário de plantio tenha que ser ajustado a um período de chuvas mais tardio e curto no cenário pessimista (Figura 4).

Com relação à média da PHR da produção de soja nas novas áreas de expansão agrícola do Cerrado, recente estudo de Silva (2018) estimou valores em torno de 2241,8 m³/t para a safra 2015/2016, com variações significativas entre os estados, o que vai de encontro aos achados desse estudo (Tabela 2). Toda via, o estudo de Silva (2018) proje-

Figura 4. Estimativa do Saldo Hídrico trimestral para lavoura de soja em cenários otimistas (RCP 4,5) e pessimistas (RCP 8,5), considerando outubro, novembro e dezembro (OND) como período de plantio e janeiro, fevereiro e março (JFM) como período de colheita.



houve redução da PHR ao longo dos anos em cenários futuros similares ao desse estudo, o que choca com os resultados apresentados na Figura 3 e nas tabelas 2 e 3, onde verificou-se um aumento da PHR média no decorrer dos anos, embora ele não alcance a diferença mínima significativa ao nível de $p < 0,05$ até a safra de 2079/2080 do cenário pessimista. Ressalta-se que Silva (2018) utilizou um município de cada estado que contém áreas de recente expansão agrícola, além de utilizar os modelos HadGEM2-ES e MIROC5 separadamente para gerar as variáveis de clima futuro em safras diferentes desse estudo.

Vários pesquisadores (Ayala *et al.*, 2016; Bocchiola *et al.*, 2013; Leng *et al.*, 2015) também estimaram aumentos na PHR e da demanda hídrica (PHT) em diferentes cenários futuros de mudanças climáticas tal como pode ser evidenciado nesse estudo. Ayala *et al.* (2016) afirmam que a produção de soja envolve grandes quantidades de água e fertilizantes que atuam como fontes de contaminação com impactos potencialmente negativos nos corpos de água adjacentes. O estudo desses pesquisadores na bacia do rio Tapajós, uma região da Amazônia brasileira com grande expansão e intensificação da soja, mostrou que os compo-

nentes verde e cinza da PHR podem sofrer aumentos de 304% e 268%, respectivamente, até 2050 em comparação a safra de 2010, o que ultrapassa os limites de sustentabilidade de mais de um terço das microbacias do Tapajós e mostra-se similar aos resultados de alguns estados investigados nesse estudo (figuras 2 e 4).

Bocchiola *et al.* (2013) estudou o efeito de cenários de mudança climática sobre a PHT do milho em uma área na Itália, no período entre 2045 e 2054 em comparação a 2010, e concluiu que a PHR, especialmente a PHA, sofrerá acréscimo devido ao aumento da evapotranspiração, maior demanda de irrigação e menor rendimento final. Para Leng *et al.* (2015), no futuro a demanda hídrica dos cultivos agrícolas das bacias dos rios Ganges, Amarelo, Indu, Haihe, Colorado e Mississipi poderão sofrer aumentos de 235% a 260% até 2099. Embora os cenários para algumas dessas regiões apontem para um futuro mais chuvoso, a elevação das temperaturas e o aumento das áreas cultivadas para atender as demandas populacionais e econômicas colocarão em risco a sustentabilidade dessas bacias de forma similar ao que é exposto nesse estudo (Tabela 3).

Conclusão

A produtividade da produção de grãos de soja nos estados que contém áreas de recente expansão agrícola no Cerrado das regiões Norte e Nordeste do Brasil, projetada pelo modelo AquaCrop para as safras futuras de médio prazo (2049/2050) e longo prazo (2079/2080), diante de cenários otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) nos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, poderão sofrer aumentos devido a maior concentração de CO₂ e elevação das temperaturas no decorrer das safras.

Embora a PHR apresente aumento significativo apenas no cenário pessimista de longo prazo, seus pequenos aumentos no decorrer das safras impactarão de forma substancial a demanda hídrica até 2080 e, conseqüentemente, a PHT quando somados as tendências de aumento de áreas de cultivo destinadas a produção desse grão. A demanda por água poderá crescer até 2,23 vezes em comparação a safra de 2017/2018.

A componente verde da PHR da soja decresce ao longo dos anos na proporção que aumenta a componente azul e o componente cinza, o que provavelmente demandará maior necessidade de irrigação no futuro e dificuldades para diluir a poluição gerada pelos fertilizantes e agrotóxicos utilizados nessa produção, o que representa um grande risco para a saúde das populações humanas e não humanas da região.

Os limites da sustentabilidade da produção de soja nessas áreas são ultrapassados no cenário pessimista, onde haverá déficit hídrico devido à grande extensão de áreas cultivadas que necessitarão de irrigação para manter a produção em um cenário de precipitação reduzida, baixa

capacidade de retenção hídrica no solo e temperaturas elevadas.

Referências

- AYALA, L.M.; VAN EUPEN, M.; ZHANG, G.; PÉREZ-SOBA, M.; MARTORANO, L.G.; LISBOA, L.S.; BELTRAO, N.E. Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, v. 570, p. 1159–1173, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.191>
- ARBUCKLE, J. G. *et al.* Farmer beliefs and concerns about climate change and attitudes toward adaptation and mitigation. *Climatic Change*, v. 118, p. 551–563, jun, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0700-0>
- BOCCHIOLA, D; NANA, E; SONCINI, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agric. Water Manager*, v. 116, p. 50–61, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.009>
- CAO, X; WANG, Y; WU, P; ZHAO, X; WANG, J. An evaluation of the water utilization and grain production of irrigated and rain-fed croplands in China. *Science of The Total Environment*, v. 529, n. 1, p. 10–20, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.011>
- CHAPAGAIN, A.K; HOEKSTRA, A.Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological economics*, v. 70, p. 749–758, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012>
- CONAMA 357/2005, 2005. Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil. **Resolução Nº 357**, de 17 de março de 2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre>. Acesso em: 12/08/2016.
- CURADO, L.F.A.; NOGUEIRA, J. DE S.; SANCHES, L.; RODRIGUES, T.R.; LOBO, F. DE A.; BÍUDES, M.S. Inter Seasonality of the Energy Fluxes in Brazilian Savana-Mato Grosso - Brazil. *Atmospheric and Climate Sciences*, v. 4, p. 219–230, 2014. <https://doi.org/10.4236/acs.2014.42025>
- DA SILVA, V.D.P.R.; DE OLIVEIRA, S.D.; HOEKSTRA, A.Y.; DANTAS NETO, J.; CAMPOS, J.H.B.C.; BRAGA, C.C.; DE ARAÚJO, L.E.; ALEIXO, D.D.O.; DE BRITO, J.I.B.; DE SOUZA, M.D.; DE HOLANDA, R.M. Water footprint and virtual water trade of Brazil. *Water*, v. 8, n. 11, p. 517–532, 2016. <https://dx.doi.org/10.3390/w8110517>
- FAO - Food and Agriculture Organization of The UN. **AQUACROP 8.0 model**. 2010. Disponível em: <www.fao.org/nr/water.html>. Acesso em: 29/05/2016.
- FRANKE, N.A.; BOYACIOGLU, H.; HOEKSTRA, A.Y. Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines. *Water Research Report Séries* n. 65, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2013. Disponível em: http://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines_1.pdf. Acesso em: 12/08/2016.
- GARCÍA-MORILLO, J.; DIAZ, J.A.R.; CAMACHO, E.; MONTESINOS, P. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 594–602, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.043>
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 01, n. 02, p. 96–99, 1985. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
- HOEKSTRA, A.Y. Water Footprint Assessment: Evolvement of a New Research Field. *Water Resources Management*, v. 231, p. 1–21, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>
- HOEKSTRA, A.Y. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecol. Indic.*, v. 66, p. 564–573, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>
- HOGBOOM, H. J; KNOOK, L.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in water resources*, v. 113, p. 285–294, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.028>

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2017**. Centro de Disseminação de Informações: IBGE, 2018. Disponível em: < <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/resultados-censo-agro-2017/resultados-preliminares.html> >. Acesso em: 12/12/2018.
- IMAFLORA - Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola. **Evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil: setor agropecuário**. São Paulo: Observatório do Clima, 2018. https://www.imaflora.org/downloads/biblioteca/Relatorios_SEEG_2018-Agro_Final_v1.pdf
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 12/03/2017.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **WGII AR5: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Summary for Policymakers**, 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- JONES, C. D.; HUGHES, J. K.; BELLOUIN, N.; HARDIMAN, S. C.; JONES, G. S.; KNIGHT, J.; LIDDICOAT, S.; O'CONNOR, F. M.; ANDRES, R. J.; BELL, C.; BOO, K.-O.; BOZZO, A.; BUTCHART, N.; CADULE, P.; CORBIN, K. D.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GORNALL, J.; GRAY, L.; HALLORAN, P. R.; HURTT, G.; INGRAM, W. J.; LAMARQUE, J.-F.; LAW, R. M.; MEINSHAUSEN, M.; OSPREY, S.; PALIN, E. J.; CHINI, L. P.; RADDATZ, T.; SANDERSON, M. G.; SELLAR, A. A.; SCHURER, A.; VALDES, P.; WOOD, N.; WOODWARD, S.; YOSHIOKA, M.; ZERROUKAT, M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 543-570, 2011. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- JONES, P.G.; THORNTON, P.K. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. **Agricultural Systems**, v. 114, p. 1-5, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002>
- KANTENBACHER, J.; HANNA, P.; COHEN, S.; MILLER, G.; SCARLES, C. Public attitudes about climate policy options for aviation. **Environmental Science & Policy**, v. 81, p. 46-53, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.12.012>
- KASSIE, B.T.; ASSENG, S.; ROTTER, R. P.; HENGSDIJK, H.; RUANE, A. C.; VAN ITTERSUM, M. K. Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models. **Climatic Change**, v.129, p.145-158, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1322-x>
- MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; FIELD, C. B. Understanding and responding to danger from climate change: the role of key risks in the IPCC AR5. **Climatic Change**, v. 136, p.427-444, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1645-x>
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A.Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 1577-1600, 2011. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- MIRANDA, E. E. DE.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de Delimitação Territorial do Matopiba**. Embrapa, Nota Técnica n. 1, Campinas, 2014. https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf
- LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M.M.C.; DALLA-NORA, E.L. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril, Environment. **Science and Policy for Sustainable Development**, v. 58, n. 6, p. 4-15, 2016. <https://doi.org/10.1080/00139157.2016.1229537>
- LENG, G; HUANG, M; TANG, Q; LEUNG, L.R. A modeling study of irrigation effects on global surface water and groundwater resources under a changing climate. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 7, p. 1285-1304, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015MS000437>.
- LU, Y; ZHANG, X; CHEN, S; SHAO, L; SUN, H. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. **J Clean Prod.** v. 116, p. 71-79, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.008>
- NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; VIVALDI, L.J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Rev. Bras. de Ciência do Solo.** v.35, p. 877-888, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300022>
- NUNES, A.C.; BEZERRA, F.M.L.; SILVA, R.A.E.; SILVA JÚNIOR, J.L.C.; GONÇALVES, F.B.; SANTOS, G.A. Agronomic aspects of soybean plants subjected to deficit irrigation. **Rev. Bras. de Eng. Agr. e Amb.**, v.20, n.7, p.654-659, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p654-659>
- O'NEILL, B. C.; OPPENHEIMER, M.; WARREN, R.; HALLEGATTE, S.; KOPP, R. E.; PÖRTNER, H. O.; BIRKMANN, J.; FODEN, W.; LICKER, R.; MACH, K. J.; MARBAIX, P.; MASTRANDREA, M. D.; PRICE, J.; TAKAHASHI, K.; VAN YPERSELE, J.-P.; YOHE, G. IPCC reasons for concern regarding climate change risks. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 28-37, 2017. <https://doi.org/10.1038/nclimate3179>
- ORLOWSKY, B.; HOEKSTRA, A. Y.; GUDMUNDSSON, L.; SENEVIRATNE, S. I. Today's virtual water consumption and trade under future water scarcity. **Environmental research letters**, v.9, n. 7, p. 1 - 5, 2014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/074007>
- PORKKA, M.; GERTEN, D.; SCHAPHOFF, S.; SIEBERT, S.; KUMMU, M. Causes and trends of water scarcity in food production. **Environmental research letters**, v.11, p. 1- 12, 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/015001>
- SANTOS, J.F.S.; SEVERO, F.A.S.; LEITE, D.C.; BARBACENA, D.R.; NAVAL, L.P. Evaluation of HadGEM2-ES and MIROC5 Models to simulate average Temperatures in the last Agricultural Frontier of the Brazilian Savannah. **IJAERS**, v. 6, n. 3, p. 63-72, 2019. <https://dx.doi.org/10.22161/iaers.6.3.9>
- SANTOS, J.F.S. Pegada hídrica soja e desenvolvimento municipal no Cerrado das Regiões Norte e Nordeste. In: XIV ENFOC, Curitiba-PR. **Anais**, v. 15, 2019.
- SANTOS, J.F.S.; BARBACENA, D.R.; SILVA, R.A. Validade dos modelos climáticos Mark-HadGEM2-ES e Mark-MIROC5 para estimar precipitação e temperatura no Tocantins. In: XVI ENEEAMB + IV FLES, Palmas-TO. **Anais**, v. 5. p. 1416-1425, 2018.
- SCHEWE, J.; HEINKE, J.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; DANKERS, R.; EISNER, S.; FEKETE, B. M.; COLÓN-GONZÁLEZ, F. J.; GOSLING, S. N.; KIM, H.; LIU, X.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F. T.; SATOH, Y.; STACKE, T.; TANG, Q.; WADA, Y.; WISSER, D.; ALBRECHT, T.; FRIELER, K.; PIONTEK, F.; WARSZAWSKI, L.; KABAT, P. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **PNAS of the United States of America**, v. 111, p. 3245-3250, 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110>
- SILVA, V.P.R.; SILVA, R.A.; MACIEL, G.F.; BRAGA, C.C.; SILVA JÚNIOR, J.L.C.; SOUZA, E.P.; ALMEIDA, R.S.R.; SILVA, M.T.; HOLANDA, R.M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Revista Ciência Rural**, v.48, n.1, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161118>
- SILVA, R. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e Pegada hídrica da soja cultivada na região do MATOPIBA**. Tese de doutorado em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande: UFCG, 2018.
- STRASSBURG, B.B.N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A.E.; OLIVEIRA FILHO, F.J.B.; SCARAMUZZA, C.A.M.; SCARANO, F.R.; SOARES-FILHO, B.; BALM-FORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 99, p. 1-3, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- THISSEN, W.; KWAKKEL, J.; MENS, M.J.P.; VAN DER SLUIJS, J.P.; STEMBERGER, S.; WARDEKKER, A; WILDSCHEUT, D. Dealing with Uncertainties in Fresh Water Supply: Experiences in the Netherlands. **Water Resour Manage**, v. 31, p. 703, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1198-1>
- VILPERT, C. **Identificação de áreas aptas a expansão agrícola na região do MATOPIBA**. INPE, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media-ser300:monografia_de_geoprocessamento_-_cleyton.pdf>. Acesso em: 27/03/2019.
- XU, Y; HUANG, K; YU, Y; WANG, X. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: a l mean Divisia index decomposition analysis. **J Clean Prod**, v. 87, p. 180-187, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.103>

WATANABE, S.; HAJIMA, T.; SUDO, K.; NAGASHIMA, T. TAKEMURA, T.; OKAJIMA, H.; NOZAWA, T.; KAWASE, H.; ABE, M.; YOKOHATA, T.; ISE, T.; SATO, H.; KATO, E.; TAKATA, K.; EMORI, S.; KAWAMIYA, M. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development**. v. 4, p: 845-872, 2011. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. Short communication: A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088-2094, 2012. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>

ZHUO, L.; MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: A study for China (1978- 2008). **Water Res.** v. 94, p. 73-85, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.037>

REFERENCIAÇÃO

SANTOS, J. F. S.; NAVAL, L. P.; LEITE, D. F. C.; BARBACENA, D. R.; SEVERO, F. A. S. Pegada hídrica da soja em cenários de mudanças climáticas na última fronteira agrícola do Cerrado nas regiões Norte e Nordeste. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.27, n.1, p.143-153, set 2019.

Declaração: os trabalhos estão sendo publicados nesse número de AGROMETEOROS (v.27, n.1, set 2019) conforme foram aceitos pelo XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, realizado de 12 a 16 de agosto de 2019, em Catalão, Goiás, sem revisão editorial adicional da revista.



Soybean water footprint in climate change scenarios in the last Cerrado biome agricultural frontier in the Brazilian North and Northeast regions

João Francisco Severo Santos^{1(*)}, Liliana Pena Naval², Danuza Francisco Costa Leite¹, Danilo Ribeiro Barbacena¹ and Fernanda Alves Silva Severo²

¹Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Unidade Estadual do IBGE no Tocantins (UE/TO). Quadra 401 Sul, Av. Joaquim Teotônio Segurado, Lt 17, ed. Gold Star 1º piso - Plano Diretor Sul, CEP 77015-550, Palmas, TO, Brazil. E-mail: coesuft@gmail.com, danuza.leite@ibge.gov.br and danilo.barbacena@ibge.gov.br

²Universidade Federal do Tocantins. Quadra 109 Norte, Av. NS-15, s/n, Plano Diretor Norte, CEP 77001-090 Palmas, TO. E-mail: liliana@uft.edu.br and fernanda.agroambiental@gmail.com

(*) Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 September 2019

Accepted 4 March 2020

Index terms:

water footprint

agriculture

climate change

Glycine max (L.) Merrill

ABSTRACT

The Water Footprint - WF is an indicator that quantifies and maps the water consumption of products and production models. Soil production in the Cerrado uses large amounts of water and involves suppression of native vegetation, which can cause and/or intensify local climate change. The objective of this study was to analyze the WF of the soybean production in the Cerrado of the states of the North and Northeast regions in the presence of two future scenarios. For this, the optimistic and pessimistic scenarios were used to generate climatic data in the Marks-GCM 3.2 simulator, in order to be inserted in the Aquacrop 5.0 model to estimate the soy yield in the 2050 and 2080 harvests, as well as its WF. The results showed that there were no significant differences between the relative WF mean (m^3/t) of the period 1999-2018 and any future scenario. However, the absolute WF (km^3) presented significant increases in all scenarios due to the tendency of expansion of the cultivated areas. Thus, if trends continue, the WF of soybean production will increase from 9.59 km^3 in 2018 to 37.46 km^3 (pessimistic scenario in 2080).

© 2020 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

SANTOS, J. F. S.; NAVAL, L. P.; LEITE, D. F. C.; BARBACENA, D. R.; SEVERO, F. A. S. Pegada hídrica da soja em cenários de mudanças climáticas na última fronteira agrícola do Cerrado nas regiões Norte e Nordeste. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.27, n.1, p.143-153, set 2019.

Disclaimer: papers are published in this issue of AGROMETEOROS (v. 27, n.1, set 2019) as accepted by the XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, held August 12-16, 2019 in Catalão, Goiás State, Brazil, without further revision by editorial board.