ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Técnicas hidricamente eficientes e modelagem: estratégias para a sustentabilidade e intensificação da agricultura frente às mudanças do clima em ambientes suscetíveis à desertificação

Sidney Anderson Teixeira da Costa¹, Luciana Sandra Bastos de Souza², Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim³, George do Nascimento Araújo Júnior⁴, Cleber Pereira Alves⁵, Carlos André Alves de Souza⁶, Kaique Renan da Silva Salvador⁷, Thieres George Freire da Silva⁸

¹ Mestrando em Produção Vegetal da Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Av. Gregório Ferraz Nogueira, s/n - José Tomé de Souza Ramos, Serra Talhada, PE, Brasil. CEP: 56909-535. sidneyeng.agro@outlook.com. ² Dr. em Meteorologia Agrícola, Professora Assistente I, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3216. sandrabastos@yahoo.com.br. ³ Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, alexandremrfj@gmail.com. ⁴ Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, georgearaujo.agro@gmail.com. ⁵ Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, cleberp.alves@hotmail.com. ⁶ Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, carlosandre08_msn.com. ⁷ Mestrando em Produção Vegetal da Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Av. Gregório Ferraz Nogueira, s/n - José Tomé de Souza Ramos, Serra Talhada, PE, Brasil. CEP: 56909-535, kaiquesalvador@gmail.com. ⁸ Dr. Professor Associado II, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3208. thieres_freire@yahoo.com.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 25/04/2021 e aceito em 13/12/2021

RESUMO

Em regiões suscetíveis a desertificação, como é o caso do Semiárido, o uso de tecnologias hídricas pode servir como ferramenta para mitigar os impactos ambientais, aumentar a eficiência no uso da água e garantir uma menor estacionalidade da produção. Nesta revisão, buscamos abordar as principais estratégias que podem contribuir para a sustentabilidade, intensificação e planejamento da atividade agrícola nas regiões com riscos de desertificação. Para isso, discutiu-se os problemas e as principais características ambientais das áreas suscetíveis a esse processo; abordou-se o uso de tecnologias hídricas (e.g. adoção de espécies vegetais resistentes ao estresse hídrico, uso de clones/cultivares mais adaptados às condições estressantes, intensidade de corte, cultivo, uso de cobertura morta), práticas que visam aumentar a eficiência do uso da água na agricultura; destacou-se o modelo AquaCrop da FAO como ferramenta para inferir sobre o impacto de possíveis cenários ambientais na agricultura, bem como simular as melhores estratégias de resiliência; e, por fim, frisou-se outros conceitos relacionados a sustentabilidade da agricultura como: eficiência no uso da água, agricultura verde, e caracterizadores de um sistema agrícola. Nossos achados reforçam a necessidade de uma visão holística dos agroecossistemas para integrar as tecnologias hídricas a outras estratégias de aumento da eficiência no uso dos recursos e de redução a liberação de gases de efeito estufa (GEE), de modo a contribuir com a sustentabilidade da atividade e a mitigação dos impactos no meio ambiente. Outrossim, com a utilização da modelagem é possível prever os impactos que as condições climáticas futura proporcionarão ao planeta, de modo a planejar estratégias mais eficazes para a convivência da agricultura com as mudanças do clima.

Palavras-chave: AquaCrop; eficiência no uso da água; estratégias de resiliência agrícola.

Water technologies and modeling: strategies in the search for sustainability and intensification of agriculture in susceptible environments to desertification

ABSTRACT

In regions susceptible to desertification, such as the semi-arid region, the use of water technologies can serve as tool to mitigate environmental impacts, increase water efficiency, and ensure a lower state of production. In this review, we seek to address the main strategies that can contribute to the sustainability, intensification and planning of agricultural activity in regions with desertification risks. To this end, the problems and main environmental characteristics of the areas susceptible to this process were discussed; the use of water technologies (e.g. adoption of plant species resistant to water

stress, use of clones/cultivars more adapted to stressful conditions, cutting intensity, cultivation, use of mulch), practices aimed at increasing the efficiency of water use in agriculture; the FAO AquaCrop model was highlighted as a tool to infer about the impact of possible environmental scenarios on agriculture, as well as to simulate the best resilience strategies; and, finally, other concepts related to the sustainability of agriculture were emphasized, such as: efficiency in the use of water, green agriculture, and characterizations of an agricultural system. Our findings reinforce the need for a holistic view of agroecosystems to integrate water technologies with other strategies to increase resource efficiency and reduce the release of greenhouse gases (GHG), to contribute to the sustainability of the activity and the mitigation of impacts on the environment. Moreover, with the use of modeling it is possible to predict the impacts that future weather conditions will bring to the planet, to plan more effective strategies for the coexistence of agriculture with climate change.

Keywords: AquaCrop; efficiency in water use; agricultural resilience strategies

* E-mail para correspondência:

thieres_freire@yahoo.com.br (Silva, T. G. F.).

Introdução

A desertificação é um processo complexo que ocorre por meio da dinâmica entre muitos fatores, sejam eles ambientais ou antrópicos (Adamo e Crews-Meyer, 2006). Esse fenômeno ocorre em diversas partes do mundo e pode resultar em perda irreversível do potencial produtivo da terra (Wijtkosum, 2016). Ademais, as alterações causadas pela desertificação podem ser vistas pela deterioração da vegetação, erosão e salinização, além da redução da biota e da fertilidade do solo, da compactação e crostas no solo (Dregne, 1986; Verstraete e Schwartz, 1991).

Diversas estratégias, como as tecnologias hídricas, podem ser empregadas para minimizar o problema da desertificação, bem como se obter melhores rendimento e viabilidade econômica da atividade agrícola nas áreas impactadas com esse processo. No entanto, ainda são escassos estudos contextualizados com uso de práticas de eficiência na agricultura e da modelagem. Arelado a isso, com uso de modelagem é possível fazer a simulação dessas tecnologias para outras condições ambientais e em cenários climáticos futuros.

As tecnologias hídricas nada mais são que práticas que possibilitam a conservação dos recursos hídricos e que favorecem a potencialização sustentável do uso das águas aplicada nos sistemas de produção (Sun et al., 2016; Liu e Basso, 2020). São exemplos de tecnologias hídricas: cultivo sob condição deficitária de água no solo em pequenas áreas; adoção de espécies sazonalmente ou persistentemente resistentes ao estresse hídrico; uso de clones/cultivares mais adaptados a um determinado ambiente; intensidade de corte; cultivo adensado para melhoria da utilização por unidade de área hidricamente irrigada; uso de

cobertura morta para melhorias térmico-hídricas e nutricionais do cultivo; consorciação entre culturas em sistema de plantio intensivo, entre outras (Stefanoski et al., 2013; Queiroz et al., 2016; Wang et al., 2016; Diniz et al., 2017; Wang et al., 2019; Jardim et al., 2021a).

Melhorias na produtividade das culturas em cenários de disponibilidade hídrica limitada, de variações de temperaturas e características dos solos, são vitais para atender a demanda global por alimentos (Balyan et al., 2017). Essa problemática vindo sendo muito discutida em diversas partes do mundo, para justamente compreender os possíveis efeitos das alterações climáticas na produção agrícola (Pareek et al., 2020). Para isso, o uso da modelagem é uma importante ferramenta que possibilita estimar a produção agrícola em possíveis cenários de mudanças ambientais envolvendo clima e solo, bem como explorar diferentes estratégias de adaptação a fim de fazer recomendações (Boote et al., 2013).

Quando se fala na utilização de modelos para estimativa da produção agrícola em diferentes cenários climáticos e ambientais, o modelo AquaCrop, desenvolvido pela FAO em 2011, é um dos mais adotados desde que foi lançado, e propõe uma modelagem de culturas agrícolas com simulação de crescimento e produtividade em função da cobertura do dossel (Akumaga et al., 2018; Bouras et al., 2019; Akinseyea et al., 2020; Rosa et al., 2020). Apesar de ser muito utilizado, estudos avaliando o desempenho do modelo para as condições edafoclimáticas brasileiras ainda são escassos, em especial para áreas com risco de desertificação, como o Semiárido brasileiro.

Não obstante, a disponibilidade hídrica é um dos principais gargalos para o avanço da produção de forragem em diversas partes do mundo. Em muitos países em desenvolvimento, a

crescente demanda por irrigação e a redução da disponibilidade de água para este fim, bem como o crescimento populacional, estão pressionando cada vez mais os recursos hídricos (Liu et al., 2017).

Para manter o uso sustentável da água no setor agropecuário e garantir a segurança alimentar, melhorias na eficiência do uso da água tornam-se indispensáveis (Fishman et al., 2015; Akinseye et al., 2020). Neste sentido, a adoção de tecnologias hídricas pode auxiliar no avanço de uma agricultura cada vez mais sustentável, em especial nas regiões com condições climáticas mais adversas, com baixo índice pluviométrico, irregular distribuição das chuvas e demanda atmosférica superior à precipitação (Marengo et al., 2016). Adicionalmente, o uso dessas tecnologias é uma ferramenta eficiente para intensificar a produção agrícola, na medida em que buscam evitar o desperdício de água e melhorar o aproveitamento dos demais recursos ambientais disponíveis. Essas estratégias podem, ainda, contribuir na minimização dos impactos sociais causados pela irregularidade na produção de alimentos em áreas com riscos de desertificação, como é o caso das regiões áridas e semiáridas.

Revisão bibliográfica

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada entre abril e dezembro de 2020, utilizando bancos de dados on-line. Não houve exclusão de nenhum período na pesquisa e nenhuma restrição de idioma foi aplicada, contudo, priorizou-se artigos internacionais. As principais palavras-chave utilizadas foram: “desertificação”; “desertificação e seus impactos na agricultura”; “Semiárido”; “sustentabilidade na agricultura”; “tecnologias hídricas”; práticas de resiliência agrícola”; “indicadores ambientais de solo”; “indicadores ambientais de clima”; indicadores ambientais de plantas”; “modelagem na agricultura”; “AquaCrop”; “calibração e validação de modelos”.

Tais palavras utilizadas como busca foram de idioma português e inglês.

Impactos ambientais da desertificação e os seus efeitos nas atividades agropecuárias

O processo de desertificação consiste em uma alteração nas terras — principalmente das zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas — decorrente tanto das características ambientais, como também das práticas antrópicas desenvolvidas nesses ambientes (Castro e Santos, 2020). As alterações causadas pela desertificação podem ser vistas pela deterioração da vegetação, erosão e salinização, redução da biota e da fertilidade e compactação do solo (Dregne, 1986; Verstraete e Schwartz, 1991).

Entre as principais causas intensificadoras da desertificação estão: a erosão do solo, acentuada devido ao desmatamento e ao agravamento da seca determinada pela maior exposição do solo à ação de ventos secos e radiação solar (Conti, 2008; Jardim et al., 2017); a salinização dos solos provocada pelo manejo inadequado como o uso incorreto de adubos químicos; irrigação com água de má qualidade; sistemas de irrigação de baixa eficiência; a ausência de utilização de práticas conservacionistas e adoção de sistemas de cultivos inadequados (Sharma et al., 2016). Além disso, outros fatores contribuem bastante para esse processo, tais como: queimadas e superpastejo de bovinos, de caprinos e ovinos em especial em áreas com fragilidade ambiental.

As áreas com risco de desertificação ocupam mais de 30% da superfície terrestre, abrangendo 100 países, onde habita mais de 1 bilhão de pessoas (Dourado, 2017). No Mapa Global da Vulnerabilidade à Desertificação (Figura 1) é possível constatar que a região mais afetada com este processo é o continente Africano, todavia é preciso ressaltar ainda o risco nas áreas da China; do Oriente Médio; da Austrália; do Sudeste dos Estados Unidos; do Oeste e do Leste da América do Sul (Cherlet et al., 2018).

Figura 1. Mapa global da vulnerabilidade à desertificação. Fonte: Atlas Mundial da Desertificação (2018).

Atualmente, muitos estudos têm buscado entender a desertificação, bem como os fatores que potencializam sua atuação (Bakr et al., 2012; You et al., 2021; Ding e Xingming, 2021). Audu (2013) apontou estreita relação entre o desmatamento e o aumento das áreas de desertificação em diversos estados da Nigéria. Por sua vez, Wijitkosum (2016), ao analisar o impacto do uso da terra no risco de desertificação em áreas degradadas na Tailândia, verificou que as atividades antrópicas que mais contribuem para a desertificação são: o excesso de cultivo e de pastagem, o desmatamento e os sistemas de irrigação mal drenados.

Corroborando com Soares et al. (2011), a desertificação aumenta o risco de mudança do clima de uma região, especialmente associado a alterações da cobertura vegetal do local, visto que, a destruição da vegetação nativa é capaz de influenciar variáveis climáticas e meteorológicas, como temperatura do ar, a umidade do solo, o albedo e a rugosidade da superfície. Além de influenciar no comportamento da atmosfera, nos fluxos de radiação, na dinâmica da evapotranspiração, e por conseguinte, podem afetar o ciclo hidrológico local (Charney et al., 1977; Sud e Molod, 1988; Oyama e Nobre, 2004; Rodrigues et al., 2019).

Diferentes impactos sociais podem surgir em função da desertificação. Esses impactos estão fortemente relacionados à diminuição da atividade agropecuária que é desencadeada frente a este processo; a perda da biodiversidade, degradação dos solos, diminuição das áreas agricultáveis pela

salinização, aumento das perdas econômicas, aumento da pobreza e aumento migratório (Pan Brasil, 2004). Conforme é abordado por Araújo e Souza (2017), na agricultura, as consequências da desertificação são bastante graves por si próprias, porém os impactos mais severos são vistos na redução da capacidade de produção das terras. Diante disso, vários indicadores de produção agropecuária podem sofrer efeitos deletérios, como o rendimento e valor da produção agropecuária; evidenciados, por exemplo, por meio da diminuição da produção de leite, queda da produção de carne, bem como a redução na produtividade de várias culturas agrícolas (Jamala et al., 2013; Geidam e Sabo, 2014; Ferreira et al., 2018).

Na agricultura os impactos da desertificação refletem ainda nos processos como os ciclos de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) nos ecossistemas agrícolas (An et al., 2019). Com efeito, Tang et al. (2016) mostraram que o conteúdo de nutrientes do solo diminuiu com o aumento do grau de desertificação, o que sugere que a desertificação contribui para uma distribuição irregular dos nutrientes do solo tornando-o o estéril à medida em que a desertificação progride.

Fica evidente que não se pode negligenciar os impactos da desertificação, em especial para a agricultura. Para isso, o desenvolvimento de trabalhos voltados a contribuir para a produção agropecuária sustentável em áreas com riscos de desertificação, bem como para a mitigação dos

fatores que contribuem para este processo, tornam-se cada vez mais importantes, especialmente, em decorrência das mudanças do clima.

Agricultura verde: intensificação sustentável e impactos das mudanças climáticas nos sistemas de produção agrícola

Muito se discute sobre os impactos do setor agropecuário nas mudanças climáticas. Em determinados campos de discussões, a agropecuária é apontada como a atividade antrópica mais perturbadora do meio ambiente, uma vez que alguns de seus modelos de produção são considerados os responsáveis por contribuir fortemente com o desequilíbrio sistêmico global (Struik e Kuyper, 2017).

De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), a agricultura sustentável envolve fatores como conservação do solo, da água, dos recursos genéticos animais e vegetais, do ambiente assim como o uso de técnicas apropriadas, economicamente viáveis e socialmente aceitáveis. Em outras palavras, a intensificação sustentável do sistema agrícola pode ser definida como a utilização de práticas de resiliência agrícola para o aumento da produção, e que atenda aos altos padrões de sustentabilidade ambiental, econômica e social, isto é, um incremento simultâneo no uso dos recursos e na eficiência do uso destes (Pretty e Bharucha, 2014; Jordan e Davis, 2015; Hunter et al., 2017).

Além disso, no contexto dos agroecossistemas, alguns autores abordam a intensificação sustentável como sendo um conceito mais amplo, como é o caso de Struik e Kuyper, (2017) citam que, a eficiência no uso de recursos possui dimensões agronômicas, ambientais, econômicas, sociais, transgeracionais e globais. A intensificação sustentável deve ser considerada como um processo de investigação e análise para navegar e resolver os problemas e preocupações em agronomia.

Se por um lado a população mundial tem aumentado ao longo dos últimos anos, atingindo cerca de 7,9 bilhões de habitantes em 2020, com previsão de atingir 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2020), por outro lado as regiões de fronteiras agrícolas têm diminuído ao redor do mundo (Sambuichi et al., 2012). Em função disso, para atender a demanda crescente de alimentos, calcula-se que será necessário um aumento de pelo menos

100% da produção agropecuária mundial (Tilman et al., 2011).

Além do aumento populacional, há um interesse crescente da população no consumo de alimentos saudáveis e oriundos de sistemas menos impactantes ao meio ambiente. Nesse sentido, conforme reforçam Godfray e Garnett (2014), a adoção de sistemas mais sustentáveis, que aumentem não só a produção através dos ganhos em produtividade e diversificação de produtos, mas também gerem serviços ambientais, pode representar uma enorme vantagem competitiva, considerando um mercado mundial cada vez mais exigente e seletivo aos modos de produção.

Os países deverão se preocupar cada vez mais com a preservação do meio ambiente na implementação de políticas públicas voltadas ao setor agrícola. Para tanto, a busca pela intensificação da produção agropecuária deverá ser baseada em estratégias sustentáveis, tais como: uso de práticas conservacionistas; preservação da biodiversidade; maior eficiência na utilização da água e do solo; implementação dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta; entre outras práticas culturais menos impactantes ao meio ambiente (Pretty e Bharucha, 2014; Carvalho et al., 2018; Fortini et al., 2020).

Como o debate da intensificação sustentável está constantemente enraizado nas discussões sobre a Revolução Verde, muitas vezes o termo “verde” é inserido nas temáticas sobre a sustentabilidade agrícola futura. Nesse sentido, Kuyper e Struik (2014) observaram que termos como “mais verde”; “crescimento verde”; “sempre verde” e “novo verde” muitas vezes são adotados como termos retóricos no discurso da Revolução Verde.

Nesse âmbito, a “agricultura verde” nada mais é que uma maneira de atingir o crescimento agrícola e o desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo que se evita a degradação ambiental e dos recursos naturais, e reduz as externalidades negativas ao passo que se utiliza os recursos com mais eficiência (Amaruzaman et al., 2017; Struik e Kuyper, 2017). A “agricultura verde” se baseia ainda em melhorar a biodiversidade, aumentar a renda dos agricultores, diminuir a poluição ambiental em escala global, contribuir para a segurança alimentar e promover desenvolvimento sustentável (Deng et al., 2018).

De acordo com Koohafkan et al. (2012), os sistemas agrícolas apropriados a enfrentarem os desafios desencadeados pelas rápidas mudanças no

planeta, exigem vários atributos que constituem os elementos definidores de uma “agricultura verde”, entre estes, destacam-se:

- a) promover práticas que melhorem a disponibilidade de água limpa, sequestro de carbono, conservação da biodiversidade, do solo e da água etc.;
- b) capacidade adaptativa aprimorada com base na premissa de que a chave para lidar com mudanças rápidas e imprevisíveis é fortalecer a habilidade de respostas adequadas, para manter um equilíbrio entre adaptabilidade a longo prazo e eficiência a curto prazo;

- c) fortalecer a capacidade adaptativa e a resiliência do sistema agrícola;
- d) manter a diversidade para permitir várias respostas à mudança e garantir a preservação de funções-chave no agroecossistema.

Assim, os sistemas agrícolas que serão resilientes a ponto de conviver e produzir de forma sustentável sob condições ambientais desafiadoras serão aqueles que apresentarem altos níveis de diversidade, produtividade e eficiência (Figura 2).

Figura 2. Características dos agroecossistemas quanto ao nível de resiliência. Fonte: adaptado de Koohafkan et al. (2012).

O plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), por exemplo, incorpora bem o conceito de “intensificação sustentável”, e tem sido pauta de discussão em diversos encontros sobre o meio ambiente ao redor do mundo, tais como o Acordo de Paris, ECO 92, RIO+20, entre outros (Viola e Franchini, 2012). A agricultura de baixo carbono envolve a redução de intensidade de carbono do PIB; redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) per capita; uso eficiente das matérias-primas; eficiência no uso da água; proteção da biodiversidade; diminuição do uso de fertilizantes na agricultura e maximização das energias renováveis na matriz energética (Viola e Franchini, 2012; Fogarassy e Nabradi, 2015; Gurgel e Laurenzana, 2016).

Destaque para os sistemas de integração, os quais são: integração lavoura-pecuária – ILP; (agropastoril); integração pecuária-floresta - IPF (silvipastoril); integração lavoura-floresta ILF

(silviagrícola); integração lavoura-pecuária floresta – ILPF (agrossilvipastoril), são considerados como estratégias a serem adotadas para implementação de uma Agricultura de Baixo Carbono (ABC) (Carvalho et al., 2014).

Segundo Carvalho et al. (2018), os sistemas integrados são projetados para criar e melhorar os sinergismos ecossistêmicos de áreas de produção integradas à floresta e/ou pecuária. Portanto, os benefícios da integração são dinâmicos entre si, mas podem ser explicados nos contextos: agrônomo, através da preservação e sustentação da capacidade produtiva do solo; econômico, visto que promove a diversidade da produção de alimentos com segurança e rendimentos mais altos a custos menores; ecológico, uma vez que reduz a necessidade de insumos nocivos ao meio ambiente; e social, pois reduz o êxodo rural com o aumento de novas oportunidades de emprego nas áreas rurais.

Cabe ressaltar que os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta não se resumem apenas na utilização de um único sistema de produção, mas sim na adoção de estratégias que podem incorporar diversas tecnologias e mesmo diversos sistemas de produção com uma visão holística do agroecossistema (Ginkel et al., 2013).

A adoção de técnicas sustentáveis na agricultura torna-se necessária, logo que, embora haja dificuldades em se projetar o clima com precisão à longo prazo, vários estudos se alinham na concepção de que os sistemas tradicionais de monocultura são particularmente sensíveis às alterações do clima (Rosenzweig et al., 2014; Hatfield e Dold, 2019).

Uma das principais preocupações relacionadas aos efeitos das mudanças climáticas diz respeito aos impactos negativos que podem proporcionar na produtividade do setor agrícola em todo o mundo (Parker et al., 2019). Estudos indicam que as regiões semiáridas se mostram mais vulneráveis a esses efeitos logo, mais propícias à problemas sociais relacionados à produção de alimentos (Kocur-Bera, 2019). A ocorrência de eventos extremos como recorde de temperaturas máximas e mínimas, de secas e cheias intensas, a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da concentração de CO₂ atmosférico deverão contribuir para um planeta com maiores desafios para a produção de alimentos (Parker et al., 2019).

Guimarães et al. (2016) ao investigarem projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste brasileiro e apontaram que alguns cenários sugerem aumento de temperatura entre 2,5 °C e 4,0 °C e aumento da evapotranspiração de referência (ET₀) de 15% até o final do século sobre esta região. De acordo com o relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), considerando um cenário mais pessimista, a temperatura global poderá superar um aumento de 5 °C até o final do século XXI. O mesmo relatório aponta que a última década foi a mais quente já registrada e, que esse aumento nas temperaturas deverá reduzir safras e acarretar impactos negativos aos ecossistemas naturais (IPCC, 2018).

As mudanças no clima ocorrerão de maneira heterogênea ao longo do globo (Mancosu et al., 2015). E espera-se que os sistemas de produções da maioria das culturas agrícolas sejam fortemente afetados (Grossi et al., 2015; Ochieng et al., 2016; Parker et al., 2019). Grande parte das pesquisas realizadas nesse contexto, se alinham no

sentido de que, até certo ponto, o aumento térmico pode melhorar pontualmente os rendimentos das safras, porém caindo drasticamente com valores de temperatura ligeiramente superiores. Hatfield e Prueger (2015), ao avaliarem o possível impacto de cenários com aumento de temperatura sobre a cultura do milho, relataram que os maiores efeitos ocorrerão no estágio reprodutivo, com a produção de grãos sendo significativamente reduzida entre 80-90% em comparação a um regime de temperatura normal. Por sua vez, Sultan et al. (2014) preveem que na produção de grãos de sorgo a redução situar-se-á entre 16 e 20% em um cenário, para o período de 2031 a 2060, com elevação de temperatura em 2,8 °C.

Portanto, considerando os efeitos deletérios que os cenários de mudanças climáticas proporcionarão aos sistemas de produção agrícola, é imprescindível o debate mundial na busca de estratégias claras de resposta de mitigação e adaptação para lidar com as ameaças representadas pelas mudanças climáticas.

Tecnologias hídricas recomendadas para regiões com baixa disponibilidade hídrica

O déficit de água ocorre na maioria dos habitats naturais ou agrícolas e é causado principalmente por períodos intermitentes ou mesmo contínuos sem precipitação. Sob estas condições, sérios prejuízos às plantas, seja durante seu crescimento vegetativo ou reprodutivo (Shinozaki et al., 2015; Taiz et al., 2017). No entanto, para minimizar os impactos sobre as plantas de ambientes em que o déficit hídrico ocorre regularmente, pode-se lançar mão do uso de tecnologias hídricas.

As tecnologias hídricas se inserem nas estratégias que possibilitam a conservação dos recursos hídricos e que favorecem a potencialização sustentável do uso da água aplicada nos sistemas de produção (Kannan e Anandhi, 2020). São exemplos destas: o cultivo sob condição deficitária de água no solo em pequenas áreas; a adoção de espécies resistentes ao estresse hídrico; uso de clones/cultivares mais adaptados a um determinado ambiente; intensidade de corte; cultivo adensado para melhoria da utilização por unidade de área hidricamente irrigada; uso de cobertura morta para melhorias térmico-hídricas e nutricionais do cultivo; consorciação entre culturas em sistema de plantio intensivo.

Atualmente, trabalhos têm sido realizados ao redor do mundo envolvendo o uso dessas tecnologias para favorecer a produção agrícola em ambientes com baixa disponibilidade hídrica (Queiroz et al., 2016; Wang et al., 2016; Jardim et al., 2021a; Jardim et al., 2021b). Estas se enquadram nas práticas agrícolas sustentáveis, uma vez que objetivam melhorar a eficiência no uso da água e consequentemente reduzir a pressão ambiental, mitigar o processo de desertificação, evitar a erosão e a salinização do solo, de modo resultar em melhorias da sustentabilidade de produção (Tuğrul et al., 2020).

O conceito de eficiência no uso da água foi introduzido há mais de 100 anos por Briggs e Shantz (1913), e, no contexto agrícola, expressa uma relação entre a produtividade da planta e o uso da água. Mais especificamente pode-se entender como a relação de aumento da quantidade de biomassa produzida por unidade de água usada por uma planta (Hatfield e Dold, 2019).

O manejo eficiente no uso da água ao mesmo tempo em que contribui com o ambiente, reflete na redução de custos de produção. Nesse aspecto, Queiroz et al. (2016) ao estudarem as relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido, mostraram que eficiência no uso da água tendeu a diminuir à medida em que se aumenta as lâminas de água aplicadas, por outro lado, o retorno econômico da cultura tende a ser maior conforme o aumento da eficiência no uso da água. Ainda, Sun et al. (2016), reforçam que a eficiência no uso da água leva em consideração não só a eficiência na sua aplicação, mas também a eficiência no seu transporte até os cultivos.

Sob esta perspectiva, o entendimento da demanda de água pelas culturas, por meio da quantificação da evapotranspiração das culturas (ETc) tem sido de grande importância. Bezerra et al. (2015) estudaram o desenvolvimento fenológico do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) em dois anos (safras) sob condições de irrigação no Semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. Os autores evidenciaram que, a variabilidade climática interanual, resultou em respostas distintas da cultura, evidenciadas na duração de seu ciclo, na sua demanda hídrica e nas suas variáveis de crescimento.

Silva et al. (2019) mostraram que o manejo eficiente no uso da água favorece a convivência com o Semiárido e a mitigação dos efeitos que a alta variabilidade climática proporciona sobre as

plantas cultivadas. Por sua vez, Azevedo et al. (2016), ao estudarem a cultura do melão irrigado por gotejamento em uma área inserida no Semiárido do Brasil, verificaram que o déficit hídrico controlado pode ser uma alternativa para aumentar a eficiência no uso da água. Por sua vez, Mila et al. (2017) constataram que a irrigação deficitária é uma técnica eficaz para regiões com escassez de água, os autores alcançaram a eficiência máxima no uso da água irrigando 60% do déficit da zona radicular em estágio vegetativo e pré-florado na cultura do girassol (variedade: BARI Surjomukhi-2) nas condições de clima semiárido de Bangladesh. Andrade Júnior et al. (2019) ao testarem diferentes níveis de seca controlada em dois híbridos simples de sorgo forrageiro, verificaram que os níveis de estresse não alteraram a composição químico-bromatológica e o teor de matéria seca dos híbridos, além constatarem maior produtividade da água com a menores lâminas de água.

O uso da irrigação de modo complementar, visando o uso eficiente dos recursos hídricos, deve ser integrada com as tecnologias hídricas, como o uso de cobertura morta, utilização de sistemas de irrigação de maior eficiência como o gotejamento, utilização de cultivares/clones adaptadas, consórcio entre culturas, plantio adensados, entre outras.

Os estudos envolvendo cultivares ou clones de plantas forrageiras resistentes ao déficit hídrico são bastante evidenciados nas regiões Semiáridas ao redor do mundo, consistindo em uma importante tecnologia hídrica, reportada, por exemplo, nos trabalhos de Shargui et al. (2014); Araya et al. (2016); Guimarães et al. (2016); Andrade Júnior et al. (2019) e Wang et al. (2019). Nesse contexto, destaca-se o uso de clones de palma forrageira resistentes as pragas (como a cochonilha do carmim), ao déficit hídrico e a salinidade do solo e da água, como uma importante alternativa para produção de forragem em regiões semiáridas (Lima et al., 2018; Jardim et al., 2020). Como também, espécies da família Poaceae, como o sorgo e o milho e outras espécies de gramíneas que podem ser alternativas viáveis nesse sentido (Bouazzama et al., 2012; Diniz et al., 2017).

O uso de cobertura morta no solo é outra estratégia que vem sendo difundida ao longo dos anos, inclusive nos modelos de agricultura de alta tecnologia. Seu uso permite extrair diversos benefícios ao sistema, tais como: o aumento da eficiência no uso água; a redução do

desenvolvimento das plantas daninhas; a diminuição da amplitude térmica das camadas superiores do solo; incremento da biomassa microbiana; promove melhorias nas características físicas do solo; além de minimizar a erosão hídrica no solo (Stefanoski et al., 2013; Nawaz et al., 2016; Ran et al., 2018; Alves et al., 2018; Souza et al., 2019; Zang et al., 2020). Nesse contexto, Chen et al. (2018) mostraram que o uso de cobertura morta incrementa o teor de nitrogênio e de carbono orgânico do solo (SOC) no sistema de monocultivo do milho. Paralelamente, Huo et al. 2017 também evidenciaram que o incremento de cobertura morta na camada subsuperficial atrelada ao uso de cobertura de plástico aumentou significativamente o SOC após 4 anos, e o aumento desta variável apresentou correlação positiva com a dessalinização.

Uma outra tecnologia hídrica muito estudada e que se mostra eficiente no uso dos recursos, trata-se do consórcio entre culturas. Essa estratégia envolve duas ou mais espécies de cultivo crescendo juntas e coexistindo por um tempo (Bi et al., 2019). Assim, o consórcio é uma prática que mostra bons desempenhos no quesito aproveitamento de água em regiões semiáridas, visto que aumenta a otimização do uso da terra e da água e dos nutrientes para o desenvolvimento das culturas (Geburu, 2015; Fung et al., 2019; Yin et al., 2020b; Jardim et al., 2020; Jardim et al., 2021a). Um exemplo reside no consórcio forrageiro cacto-sorgo, que proporciona uma vantagem biológica e capacidade competitiva, com maior índice produtivo que monoculturas destas espécies (Farias et al., 2000; Diniz et al., 2017; Jardim et al., 2021a). Nesse contexto, Costa et al. (2018) também evidenciaram um maior aproveitamento dos recursos e maior qualidade de silagem do consórcio de *Pennisetum glaucum* (L.) R. (milheto) com outras forrageiras, entre elas a *Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás. Nessa temática, Oliveira Filho et al. 2016 demonstraram que o consórcio de mamona com milho atrelado ao aumento de densidade de plantas da cultura principal (mamona) aumentou a eficiência no uso da terra. Por sua vez, Couto et al., 2020 evidenciaram que o consórcio adensado de *Lactuca sativa* (alface) em hortas agroflorestais manteve a produtividade da espécie ao passo que reduziu a quantidade de insumos. Paralelamente, cabe ressaltar, que escolhas inadequadas de arranjos e densidades de plantas no sistema consorciado pode proporcionar uma competição acentuada entre as

espécies, de modo que o rendimento individual venha a ser inferior ao obtido em cultivo solteiro. Por isso, recomenda-se, além de se medir o rendimento, ponderar outros índices que ajudem na tomada de decisão do melhor arranjo no consórcio.

Por conseguinte, no contexto ambiental de regiões Semiáridas, em que muitos estudos demonstram altos riscos de desertificação, as tecnologias hídricas são ferramentas para mitigar os impactos ambientais bem como diminuir a disparidade hídrica espaço-temporal da umidade do solo, a fim de garantir uma menor estacionalidade da produção agrícola caracterizando-se, portanto, como tecnologias imprescindíveis para a convivência nestes ambientes.

Indicadores ambientais para caracterização de sistemas de produção

Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou indicadores com alguma relação entre si, com diferentes níveis de interações que podem afetar o seu desempenho (Adams et al., 2013). Em sistemas agrícolas, os indicadores relacionados ao solo, planta e atmosfera são considerados aqueles de maior importância, logo, a caracterização é essencial. No entanto, a depender do objetivo do estudo, a interação de fatores bióticos como patógenos e artrópodes no sistema podem ser levados em consideração (Fiorini et al., 2020).

Os indicadores do solo podem ser químicos, físicos e/ou biológicos. Os químicos estão relacionados principalmente à fertilidade, pH, disponibilidade de fósforo, capacidade de troca catiônica, ciclagem de nutrientes, nitrogênio orgânico, teor de carbono orgânico no solo, teor de matéria orgânica, salinidade e a presença ou não de metais pesados (Cardoso et al., 2013; Li et al., 2019; Huera-Lucero et al., 2020). Já os principais caracterizadores físicos do solo dizem respeito, principalmente, a sua densidade, porosidade, condutividade hidráulica, potencial erosivo, estrutura, consistência, compactação e topografia da área (Stefanoski et al., 2013; Nawaz et al., 2013; Bünemann et al., 2018; Hao et al., 2019; Yin et al., 2020b).

Os indicadores biológicos do solo estão relacionados à abundância individual de determinados microrganismos e artrópodes e suas atividades ou funções (Bunemann et al., 2018; Jardim et al., 2018). Na maioria dos trabalhos, quando se estudam indicadores biológicos do solo,

são verificadas, por exemplo, a concentração ou a população de minhocas, nematoides, cupins, formigas e biomassa microbiana, além de índices de respiração do solo, mineralização de nitrogênio, nitrogênio potencialmente mineralizável (Griffiths et al., 2018; Huera-Lucero et al., 2020; Fiorini et al., 2020). Os indicadores biológicos incluem ainda processos metabólicos, como a respiração, usados para mensurar a atividade microbiana relacionada à decomposição da matéria orgânica no solo, síntese de DNA e proteínas, atividades enzimáticas e o quociente metabólico (qCO_2), que está associada à mineralização do substrato orgânico e é determinado pela razão respiração/biomassa microbiana (Adetunji et al., 2017; Bünenmann et al., 2018; Schlöter et al., 2018; Li et al., 2019; Huera-Lucero et al., 2020).

Além disso, quando se fala especificamente de um sistema agrícola, as práticas antrópicas relacionadas ao manejo e condução da atividade, apesar de não serem indicadores ambientais propriamente dito, afetam diretamente no comportamento desse sistema, uma vez que podem influenciar nas características ou nos seus indicadores. Com efeito, estudos são desenvolvidos no sentido de verificar a contribuição de diferentes tipos e níveis de manejos no agroecossistema e consequentemente no desempenho de culturas agrícolas, a fim de subsidiar a elaboração de modelos matemáticos que mensurem esse efeito. Um exemplo disso, está no trabalho de Fiorini et al. (2020), que ao estudarem os efeitos do plantio direto durante 7 anos nas características de diferentes tipo de solo levando em consideração sistemas de cultivo para produção de silagem e grãos, constaram que essa prática induz a alterações nos indicadores de qualidade do solo como o aumento do estoque de carbono na camada superficial e aumento na quantidade de microartrópodes por metro quadrado de solo, reforçando ainda que a adaptação e proliferação da fauna do solo é um dos principais sinalizadores da qualidade do solo.

Ainda dentro do sistema agrícola, os atributos relacionados a planta assumem extrema importância, uma vez que estes, na maioria das vezes, indicarão a tolerância das plantas a determinados estresses e consequentemente definem a produtividade. Nesse contexto, indicadores como a taxa fotossintética, eficiência no uso da radiação, taxa de absorção de água e de nutrientes, parâmetros de competição intra e interespecífico e parâmetros considerados na

determinação de indicadores da planta a estresses abióticos podem ser utilizados na elaboração de modelos de simulação (Willey e Rao, 1980; Ashraf e Harris, 2004; Renato et al., 2018; Khusanbayevich et al., 2020). Não obstante, atributos relacionados à fenologia, como cobertura do dossel, duração do ciclo, características do sistema radicular e senescência, são utilizados em modelos de simulação (Dubey e Sharma, 2018; Li et al., 2019).

Por fim, destacam-se os atributos meteorológicos, que são recursos ambientais diretamente relacionados com o crescimento e desenvolvimento das plantas, tendo sido utilizados neste caso, variáveis como: precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e radiação fotossinteticamente ativa. Estas tem sido usada de maneira isolada ou para obtenção de outros indicadores como é o caso da eficiência no uso da radiação ou dos graus dias acumulados (Coblentz et al., 2018). E de um modo geral, têm sido bastante aplicados nos trabalhos de modelagem e simulação da produtividade agrícola (Paltasingh et al., 2012). Souza et al. (2018) utilizaram variáveis como amplitude térmica, temperaturas máxima, média e mínima, precipitação e índice de umidade como indicadores para o zoneamento agrícola da palma forrageira para o estado de Sergipe, Brasil. Por sua vez, Powell e Reinhard (2016) utilizaram, entre outros, temperatura e precipitação em diferentes cenários climáticos para simular a produtividade de trigo em diferentes condições de eventos extremos para a Holanda. Já Paltasingh et al. (2012) utilizaram o índice de aridez na simulação de rendimento de culturas agrícolas na China.

A modelagem para análise de sistemas de produção

Um modelo matemático busca representar de forma simplificada uma determinada teoria, com o qual é possível fazer previsões que podem ser comparadas com as observações reais de um evento ou fenômeno da natureza (Rivett, 1980). Com efeito, Tucci (2005) conceitua um modelo como sendo a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Modelos são ainda sistemas conceituais compostos por informações, operações e regras que conduzem as interações que são expressas usando sistema de notação externa e que são usados para construir, descrever, relacionar ou explicar os

comportamentos de outro sistema, com objetivo que este sistema possa ser manipulado ou previsto de forma inteligente e com nível de confiança (Lambin, 1997; Sodré, 2007).

A modelagem matemática faz parte da vida do homem desde os tempos remotos, quando já se utilizava de noções matemáticas para modelar e resolver problemas que surgiam. Entre os clássicos modelos mais importantes criados pelo homem, pode-se citar: a roda inventada pelos Sumérios no ano 3000 a.C.; o modelo criado por Eratóstenes (276-196 a.C.) para calcular a circunferência da Terra; e os modelos criados por Galileu-Galilei (1564-1642) para explicar a queda dos corpos e o movimento elíptico dos projéteis (Refeldt, 2010).

Conforme relatado por Turban et al. (2004), a simulação necessita de um modelo que, geralmente, busca assumir a aparência das características da realidade, ou seja, simulá-la de maneira mais próxima possível. Segundo estes autores, a simulação caracteriza-se ainda como uma ótima ferramenta para realizar experiências que podem antecipar os resultados e as características de um determinado sistema, levando em consideração seus indicadores, atributos ou componentes. Nesse aspecto, a escolha das variáveis utilizadas dependerá do objetivo do estudo, e geralmente são escolhidos aqueles que mais influenciam o comportamento do objeto a ser estudado (Nikulina et al., 2019).

Os modelos de simulação podem ser classificados em determinísticos ou probabilísticos; estáticos ou dinâmicos; discretos, contínuos ou combinados (Law, 1991). O sistema determinístico é modelado analiticamente, logo, é adotado à medida em que o modelo se torna mais simples e envolve menos variáveis ou interações entre seus componentes (Maria, 1997). Em síntese, um modelo determinístico supõe certas condições que, se alcançadas determinam um resultado esperado em um experimento (Bartlett, 1956; Irwin e Wang, 2014). É considerado probabilístico quando os dados que o compõe são oriundos de eventos aleatório e conduzem a saídas aleatórias. E ao contrário da situação determinística a simulação probabilística está mais próxima da realidade (Kettenis, 1992).

Os modelos estáticos são aqueles aplicados nas situações em que o tempo é irrelevante para os sistemas (Hosseinalipour et al., 2013). Já os modelos dinâmicos representam sistemas que mudam por meio do tempo, ou seja, sua característica principal é a presença de uma

variável indexada representando o tempo do sistema (Safiullin e Safiullin, 2018).

O modelo de simulação é discreto se a passagem do tempo é feita em intervalos de um evento a outro. Neste caso supõe-se que o estado do sistema não se altera ao longo do intervalo entre a ocorrência dos dois eventos consecutivos, isto é, não se altera de forma sucessiva (Bogado et al., 2011). Já no modelo de simulação contínuo, o tempo é adotado como se fosse realmente contínuo, muito embora, sejam utilizados em pequenos intervalos, em virtude do método empregado e do próprio computador, sendo muito adotado no estudo dos sistemas que envolvem equações algébricas diferenciais (Gustafsson et al., 2017). Por outro lado, naqueles modelos considerados combinados (contínuos/discretos), as variáveis independentes podem se alterar tanto de forma discreta quanto contínua, e o comportamento do sistema é simulado pelo exame das variáveis em pequenos incrementos de tempo e os atributos das entidades na ocorrência dos eventos (Kettenis, 1992).

Após a elaboração de um modelo matemático, é necessário realizar a sua verificação e validação para constatar se produz os resultados projetados e inferir sobre sua precisão (Davis, 1992). Nesse aspecto é verificado se a lógica do modelo foi corretamente programada e se não existem erros como variáveis fora de faixa (Fontoura Júnior et al., 2010). Já a validação é uma etapa para constatar a possível adequabilidade do modelo matemático caracterizador de um sistema estudado, isto é, determinar se suas inferências sobre o sistema real estão corretas para algum nível de confiança aceitável (Carson, 1986). Para essa validação pode ser necessário a condução e obtenção de dados de um experimento para testar algumas estimativas do modelo, ou pode envolver ainda a verificação da consistência do modelo com resultados teóricos. Segundo Robinson (1992), a verificação e validação de um modelo é indispensável para colocar a confiança nos resultados obtidos no estudo.

A aplicação da simulação por modelagem tem crescido em todas as áreas, auxiliando os gestores na tomada de decisão em problemas complexos e possibilitando um melhor conhecimento da influência dos componentes de um sistema. Um dos avanços do uso da modelagem tem sido nos estudos de processos físicos, com aplicações, por exemplo, em estudos climáticos; dinâmica populacional e impacto ambiental;

Hidrologia; Geotecnologia; Agrometeorologia (Morrison e Kolden, 2015; Ethier et al., 2018; Akinseyea et al., 2020; Liu e Basso, 2020; Costa et al., 2021).

Há mais de dois séculos que a modelagem é utilizada com intuito de mensurar os efeitos das variáveis ambientais relacionadas ao crescimento e desenvolvimento das culturas. No entanto, só a partir de 1950, aconteceu o desenvolvimento de trabalhos mais elaborados que formalizaram o que seria a base para estudos envolvendo a aplicação da modelagem na agricultura (Zadoks e Rabbinge, 1985; Corrêa et al., 2011). Os primeiros trabalhos de grande relevância nesse sentido, e que ainda hoje são tidos como referência, foram desenvolvidos por Wit (1958) e (1968), estes trabalhos despertaram o interesse de vários pesquisadores de diversos países, inclusive no Brasil, a desenvolverem trabalhos no contexto da modelagem na agricultura. No trabalho de Wit (1958) intitulado "Transpiration and crop yield" o autor reforçou por meio de modelos a importância da transpiração na produção agrícola em diferentes condições, já em 1968, o clássico trabalho "Photosynthesis of leaf canopies" o autor enfatizou a importância de se calcular o efeito de certos fatores ambientais na taxa de fotossíntese.

Modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop é um software que foi desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da FAO em 2009 e é disponibilizado gratuitamente (<http://www.fao.org/AquaCrop/en/>). Com a finalidade de auxiliar a gestão e produção agrícola em relação ao efeito da água sobre a produção, atualmente, está na sua versão 6.1, e propõe uma modelagem do rendimento de culturas agrícolas com simulação de crescimento e determinação da produtividade real em função da cobertura do dossel, em que a água é um fator limitante (Akumaga et al., 2018; Bouras et al., 2019).

O AquaCrop pode ser usado para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal, de modo a facilitar o entendimento do comportamento da cultura em variados contextos ambientais, e em escalas

regional e global para prever ou explorar o potencial produtivo sob certas condições, consistindo em uma ferramenta de gerência e tomada de decisão (Dubey e Sharma, 2018).

Conforme pode ser observado na Figura 3, o modelo usa entradas separadas de componentes climáticos (chuva, evapotranspiração e temperaturas máximas e mínima); parâmetros de cultivo; manejo (irrigação e campo); e solo (características físicas e capacidade de armazenamento) para simulação. A simulação diária do desenvolvimento e crescimento da cultura no AquaCrop é integrada ao balanço hídrico do solo, que fornece uma plataforma robusta e precisa para modelar diferentes cenários de manejo agrícola com a água sendo um fator limitante na produção (Steduto et al., 2009; Dubey e Sharma, 2018).

Desde que o modelo foi lançado, vários estudos buscam calibrá-lo e validá-lo para culturas diversas. Mkhabela e Bullock (2012) obtiveram precisão aceitável na calibração e validação do modelo AquaCrop para simulação de rendimento de grãos de trigo e teor de água do solo em uma área do Canadá. Dubey e Sharma (2018), nas condições edafoclimáticas do Rajastão, Índia, calibraram e validaram o AquaCrop para prever o rendimento do milho, do trigo e da cevada em dois cenários de mudanças climáticas para o período futuro de 2021-2050. Por sua vez, Abedinpour et al. (2012) obtiveram erro entre 2,5 e 27,5 % na validação do AquaCrop para variáveis de produtividade do milho em um ambiente semiárido da Índia usando dados experimentais de dois anos (2009 e 2010).

Os modelos de simulação representam importantes ferramentas que auxiliam no entendimento antecipado dos efeitos das alterações do ambiente, e, podem auxiliar no planejamento das nações para se conviver com estas. Não obstante, ainda há muito a progredir com os estudos de modelagem.

Figura 3. Fluxograma do AquaCrop indicando os principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera e os parâmetros de fenologia, cobertura do dossel, transpiração, biomassa e rendimento final [Irr, irrigação; Tmin, temperatura mínima do ar; Tmax, temperatura máxima do ar; ETo, evapotranspiração de referência; E, evaporação do solo; Tr, transpiração; Ces, condutância estomática; PA, produtividade da água; IC, índice de colheita; CO₂, concentração de CO₂ atmosférico; (1), (2), (3), (4), diferentes funções de resposta ao estresse hídrico]. Linhas contínuas indicam links diretos entre variáveis e processos. Linhas tracejadas indicam feedbacks. Fonte: adaptado de Steduto et al. (2009).

Considerações finais

Processos como a desertificação e as mudanças do clima podem alterar de sobremaneira a capacidade produtiva de regiões semiáridas. De encontro isso, é imprescindível lançar mão de estratégias, como as tecnologias hídricas, que aumentem a sustentabilidade da agricultura, especialmente no que diz respeito a eficiência do uso da água. Adicionalmente, o uso da modelagem no contexto das práticas sustentáveis pode contribuir para antecipação dos impactos da mudança do clima e na construção de estratégias resilientes para os agroecossistemas do futuro imediato, problemática de extrema relevância para as regiões suscetíveis a desertificação, como os locais semiáridos. Nesse sentido, uma visão holística do processo é primordial no sentido de buscar e difundir estratégias de melhor convivência com as alterações do ambiente.

Agradecimentos

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica de Serra Talhada pela estrutura. À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do estado de Pernambuco (FACEPE), processos: IBPG-0473-5.01/20; APQ-0215-5.01/10 e FACEPE – APQ – 1159 - 1.07/14. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos: 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286/2015-3, 309421/2018-7 e 152251/2018-9). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES (Código Financeiro 001) pelas bolsas de pesquisa e estudo.

Referências

Abedinpour, M.; Sarangi, A.; RajpuT, T.B.S.; Singh, M.; Pathak, H.; Ahmad, T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Manage.* 110, 55–66.

- Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Adamo S. B.; Crews-Meyer, K. A. 2006. Aridity and desertification: exploring environmental hazards in Jachal, Argentina. *Applied Geography*, 26(1), 61-85. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.09.001>
- Adams, K. M.; Hester, P. T.; Bradley, J. M.; Meyers, T. J.; Keating, C. B. 2013. Systems Theory as the Foundation for Understanding Systems. *Systems Engineering*, 17(1), 112-123. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sys.21255>
- Adetunji, A. T.; Lewu, F. B.; Mulidzi, R.; Ncube, B. 2017. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(3), 794-807. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S07-18-95162017000300018>
- Akinseye, S. M.; Ajeigbe, H. A.; Traore, P. C. S.; Agelee, S. O.; Zemadim, B.; Whitbread, A. 2020. Improving sorghum productivity under changing climatic conditions: A modelling approach. *Field Crops Research*, 123, 107685. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107685>
- Akumaga, U.; Tarhule, A.; Piani, C.; Traore, B.; Yusuf, A. 2018. Utilizing Process-Based Modeling to Assess the Impact of Climate Change on Crop Yields and Adaptation Options in the Niger River Basin, West Africa. *Agronomy*, 8(2), 11. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy8020011>
- Alves, H. K. M. N.; Jardim, A. M. R. F.; Souza, L. S. B.; Silva, T. G. F. 2018. The application of agrometeorological techniques contributes to the agricultural resilience of forage cactus: A review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(3), 207-220
- Amaruzaman, S.; Leimona, B.; Noordwijk, M.; Lusiana, B. 2017. Discourses on the performance gap of agriculture in a green economy: a Q-methodology study in Indonesia. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13(1), 233-247. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1331264>
- An, H.; Tang, Z.; Keesstra, S.; SHANGGUAN, Z. 2019. Impact of desertification on soil and plant nutrient stoichiometry in a desert grassland. *Scientific Reports*, 9(1), p.1-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45927-0>
- Andrade Júnior, I. O.; Santos, S. R.; Kondo, M. K.; Oliveira, P. M.; Rocha Júnior, V. R. 2019. Response of forage sorghum to water availability in a typical quartzipsamment. *Revista Caatinga*, 32(4), 1015 – 1026. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/198321252019v32n418rc>
- Araújo, J. A.; Souza, F. R. 2017. Abordagens sobre o processo de desertificação: uma revisão das evidências no Rio Grande do Norte. *Geosul*, 32(65), 122-143. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2017v32n65p122>
- Araya, A.; Kisekka, I.; Holman, J. 2016. Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34, 465-481. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Ashraf, M.; Harris, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. 2004. *Plant Science*, 166, 3-16. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.024>
- Audu, E.B. 2013. Fuel Wood Consumption and Desertification in Nigeria. *International Journal of Science and Technology*, 3(1), 1-5. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Fuel-Wood-Consumption-and-Desertification-in-Audu/b1969985dd194e80fa381b7132fd118226266f30>
- Azevedo, B. M.; Bomfim, G. V.; Nascimento Neto, J. R.; Viana, T. V. A.; Vasconcelos, D. V. 2016. Irrigation depths and yield response factor in the productive phase of yellow melon. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(4), 1-13. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016802>
- Balyan, S.; Kumar M.; Mutum, R. D.; Raghuvanshi, U.; Agarwal, P.; Mathur, S.; Raghuvanshi, S. 2017. Identification of miRNA-mediated drought responsive multi-tiered regulatory network in drought tolerant rice, Nagina 22. *Scientific Reports*, 7, 15446. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15450-1>
- Bakr, N.; Weindorf, D. C.; Bahnassy, M. H.; El-Badawi, M. M. 2012. Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: Environmental indicators. *Ecological Indicators*, 15(1), 271-280
- Bartlett, M. S. 1956. Deterministic and stochastic models for recurrent epidemics. In: *Proceedings of the Third Berkeley Symposium on*

- Mathematical Statistics and Probability, 4. California: University of California Press
- Bezerra, B. G.; Bezerra, J. R. C.; Silva, B. B.; Santos, C. A. C. 2015. Surface energy exchange and evapotranspiration from cotton crop under full irrigation conditions in the Rio Grande do Norte State, Brazilian Semi-Arid. *Bragantia*, 74(1), 120-128. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0245>
- Bi, Y., Zhou, P., Li, S., Wei, Y., Xiong, X., Shi, Y., Liu, N., & Zhang, Y. (2019). Interspecific interactions contribute to higher forage yield and are affected by phosphorus application in a fully-mixed perennial legume and grass intercropping system. *Field Crops Research*, 244(December 2018), 107636. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107636>
- Boote, K. J.; Jones, J.; White, J. W.; Asseng, S. D.; Lizaso, J. I. 2013. Putting mechanisms into crop production models. *Plant, Cell and Environment*, 36,1658–1672. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pce.12119>
- Bouazzama, B.; Xanthoulis, D.; Bouaziz, A.; Ruelle, P.; Mailhol, J. 2012. Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in a semi-arid climate of Tadla (Morocco). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 16(4), 468-477
- Bouras, E.; Jarlan, L.; Khabba, S.; Er-Raki, S.; Dezetter, A.; Sghir, F.; Trambly, Y. 2019. Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports*, 9(1), 19142. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>
- Briggs, L. J.; Shantz, H. L. 1913. "The water requirement of plants,". Bureau of Plant Industry Bulletin (Washington, DC: US Department of Agriculture), p.282–285, 1913.
- Bünemann, E. K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; Creamer, R. E.; Deyn, G.; Brussaard, L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cardoso, E. J. B. N.; Vasconcellos, R. L. F.; Bini, D.; Miyauchi, M. Y. H.; Santos, C. A. 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. *Scientia Agricola*, 70(4), 274-289. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
- Carson, J. S. 1986. Convincing Users of Model's Validity is Challenging Aspect of Modeler's Job. *Industrial Engineering*, 18(6), 74-85
- Carvalho, P. C. F.; Barro, R. S.; Barth Neto, A.; Nunes, P. A. A.; Moraes, A. 2018. Integrating the pastoral component in agricultural systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 47, 1-14. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/rbz4720170001>
- Carvalho, P. C. F.; Moraes, A.; Pontes, L. S.; Anghinoni, I.; Sulc, R. M.; Batello, C. 2014. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5), 1040-1046. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rca/v45n5spe/20.pdf>
- Castro, F. C.; Santos, A. M. 2020. Salinidade do solo e risco de desertificação na região Semiárida. *Mercator (Fortaleza)*, 19, e190022020. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002>
- Charney, J. G.; Quirk, W.J.; Chow, S.H.; Kornfield, J. 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 34(9), 1366-1385. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/15200469\(1977\)034<1366:ACSOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200469(1977)034<1366:ACSOTE>2.0.CO;2)
- Chen, J.; Heiling, M.; Resch, C.; Mbaye, M.; Gruber, R., & Dercon, G. 2018. Agriculture, Ecosystems and Environment Does maize and legume crop residue mulch matter in soil organic carbon sequestration? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265, 123–131. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.005>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., HILL, J., Sommer, S., Von Maltitz, G. (Eds.), *Atlas Mundial de Desertificação*, Serviço de Publicação da União Europeia, Luxemburgo, 2018
- Coblentz, W. K.; Akins, M. S.; Kalscheur, K. F.; Brink, G. E.; Cavadini, J. S. 2018. Effects of growth stage and growing degree day accumulations on triticale forages: 1. Dry matter yield, nutritive value, and in vitro dry matter disappearance. *Journal of Dairy Science*, 101(10), 8965-8985. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14868>
- Conti, J. B. 2008. O conceito de desertificação. *Climatologia e estudos da paisagem*, 3(2), 39-

52. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/2091>
- Corrêa, S. T. R.; Lorençoni, R.; Dourado Neto, D.; Scarpore, F. V.; Vivian, R.; Ruiz, E. T. 2011. Aplicações e limitações da modelagem em agricultura – Revisão. *Revista de Agricultura*, 86(1), 1-13. Disponível em: http://www.fealq.org.br/ojs/index.php/revistadeagricultura/article/view/75/pdf_2789
- Costa, M. S.; Oliveira-Júnior, J. F.; Santos, P. J.; Correia Filho, W. L. F.; Gois, G.; Blanco, C. J. C.; Teodoro, P. E.; Silva Junior, C. A.; Santiago, B. D.; Souza, E. O.; Jardim, A. M. R. F. 2021. Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño–Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 41, E2111-E2135
- Costa, R. R. G.; Costa, K. A. P.; Souza, W. F.; Epifanio, P. S.; Santos, C. B.; Silva, J. T.; Oliveira, S. S. 2018. Production and quality of silages pearl millet and palisadegrass in monocropping and intercropping in different forage systems. *Bioscience Journal*, 34(2), 357-367. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n2a2018-33843>
- Davis, P. K. 1992. Generalizing Concepts and Methods of Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) for Military Simulations. Santa Monica, CA: RAND Corporation. Disponível em: <https://www.rand.org/pubs/reports/R4249.html>
- Deng, M.; Xiang, G.; Yao, S. 2018. The effectiveness of the multilateral coalition to develop a green agricultural products market in China based on a TU Cooperative Game Analysis. *Sustainability*, 10(5), 1476-1492. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10051476>
- Diniz, W. J. S.; Silva, T. G. F.; Ferreira, J. M. S.; Santos, D. C.; Moura, M. S. B.; Araújo, G. G. L.; Zolnier, S. 2017. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9) 724-733. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900004>
- Ding, H.; Xingming, H. 2021. Spatiotemporal change and drivers analysis of desertification in the arid region of northwest China based on geographic detector. *Environmental Challenges*, 4, 100082
- Dourado, C. S. 2017. Áreas de risco de desertificação: cenários atuais e futuros frente às mudanças climáticas. 2017. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2017
- Dregne, H. E. Desertification of Arid Lands. 1986. *Physics of Desertification*, 4–34. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-009-4388-9_2
- Dubey, S. K.; Sharma, S. 2018. Assessment of climate change impact on yield of major crops in the Banas River Basin, India. *Science of the Total Environment*, 635, 10-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.34>
- Ethier, M.; Bussière, B.; Broda, S.; Aubertin, M. 2018. Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 26(1), 1201-1219. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1713-y>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004. The ethics of sustainable agricultural intensification. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Disponível em: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/j0902e/j0902e00.pdf>; acessado em 14 Abr 2016
- Farias, I.; Lira, M. A.; Santos, D. C.; Tavares Filho, J. J.; Santos, M. V. F.; E Santos, V. F. 200. Manejo de colheita e espaçamento da palma-forrageira, em consórcio com sorgo granífero, no Agreste de Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(2), 341-347. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000200013>
- Ferreira, M. P. S.; Artur, A. G.; Queiroz, H. M.; Romero, R. E.; Costa, M. C. G. 2018. Changes in attributes of soils subjected to fallow in desertification hotspot. *Revista Ciência Agronômica*, 49(1), 22-31. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180003>
- Fiorini, A.; Boselli, R.; Maris, S. C.; Santelli, S.; Perego, A.; Acutis, M.; Brenna, S.; Tabaglio, V. 2020. Soil type and cropping system as drivers of soil quality indicators response to no-till: A

- 7-year field study. *Applied Soil Ecology*, 55, 103646, 1036-1046
- Fishman, R.; Devineni, N.; Raman, S. 2015. Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater?. *Environmental Research Letters*, 10(8), 1-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084022>
- Fogarassy, C.; Nabradi, A. 2015. Proposals for low-carbon agriculture production strategies between 2020 and 2030 in Hungary. *Applied Studies in Agribusiness and Commerce*, 9(4), 5-16. Disponível em: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.226116>
- Fontoura Júnior, J. A. S.; Siewerdt, F.; Dionello, N. J. L.; Corrêa, M. N.; Silva, C. A. O. 2010. Verificação e calibração do modelo de simulação do desempenho reprodutivo de vacas de corte baseado no escore de condição corporal avaliação interna. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(12), 2769-2779. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001200030>
- Fortini, R. M.; Braga, M. J.; Freitas, C. A. 2020. Impacto das práticas agrícolas conservacionistas na produtividade da terra e no lucro dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 58(2):e199479. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103646>
- Fung, K. M.; Tai, A. P. K.; Yong, T.; Liu, X., & Lam, H. 2019. Co-benefits of intercropping as a sustainable farming method for safeguarding both food security and air quality. *Environmental Research Letters*, 14(4), 044011. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc8b>
- Gebu, H. 2015. A Review on the Comparative Advantages of Intercropping to Mono-Cropping System. 5(9), 1-14
- Geidam, K.; Sabo, R. The Impact of Desertification on Agriculture with Reference to Geidam, Nigeria. 2014. *Journal of Social Sciences and Humanities*. 1(4), 22 -34. Disponível em: https://www.academia.edu/9043066/The_Impact_of_Desertification_on_Agriculture_with_Reference_to_Geidam_Nigeria
- Ginkel, M.; Sayer, J.; Sinclair, F.; Aw-Hassan, A.; Craufurd, P. 2013. An integrated agro-ecosystem and livelihood systems approach for the poor and vulnerable in dry áreas. *Food Security*, 5(5), 751-767. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0305-5>
- Godfray, H. C.; Garnett, T. 2014. Food security and sustainable intensification. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 369, 1639. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.027>
- Griffiths, B. S.; Faber, J.; Bloem, J. 2018. Applying soil health indicators to encourage sustainable soil use: The transition from scientific study to practical application. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9), 3021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10093021>
- Grossi, M. C.; Justino, F.; Rodrigues, R. A.; Andrade, C. L. T. 2015. Sensitivity of the sorghum yield to individual changes in climate parameters: modelling based approach. *Bragantia*, 74(3), 341-349. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0411>
- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Tabosa, J. N.; Santos, J. E.; Willadino, L. 2016. Cultivation of forage sorghum varieties irrigated with saline effluent from fish-farming under semiarid conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(5), 461-465. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p461-465>
- Guimarães, S. O.; Costa, A. A.; Vasconcelos Júnior, F. C.; Silva, E. M.; Sales, D. C.; Araújo Júnior, L. M.; Souza, S. G. 2016. Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste Brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(3), 337-365. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150150>
- Gurgel, A. C.; Laurenzana, R. D. Desafios e Oportunidades da Agricultura Brasileira de Baixo Carbono. Cap. 12 In: *Agricultura, Transformação Produtiva e Sustentabilidade*. Org(s): Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea. BRASÍLIA, 2016
- Gustafsson, L.; Sternad, M.; Gustafsson, E. 2017. The Full Potential of Continuous System Simulation Modelling. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 5(4), 253-299. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ojmsi.2017.54019>
- Hao, M. H.; Zhang, J.; Meng, M.; Chen, H. Y. H.; Guo, X.; Liu, S.; Ye, L. 2019. Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests. *Scientific Reports*, 9, p.1-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44921-w>
- Harmanny, K. S.; Malek, Z. 2019. Adaptations in irrigated agriculture in the Mediterranean

- region: an overview and spatial analysis of implemented strategies. *Regional Environmental Change*, 19(4), 1401-1416. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01494-8>
- Hatfield, J. L.; Dold, C. 2019. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*, 10(2), 103-112. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hatfield, J. L.; Prueger, J. H. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hosseinalipour, S. M.; Abdolahi, E.; Razaghi, M. 2013. Static and Dynamic Mathematical Modeling of a Micro Gas Turbine. *Journal of Mechanics*, 29(2), 327-335. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/jmech.2013.3>
- Huera-Lucero, T.; Labrador-Moreno, J.; Blanco-Salas, J.; Ruiz-Téllez, T. 2020. A framework to incorporate biological soil quality indicators into assessing the sustainability of territories in the ecuadorian amazon. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7), 3007. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12073007>
- Hunter, M. C.; Smith, R. G.; Schipanski, M. E.; Atwood, L. W.; Mortensen, D. A. 2017. Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. *BioScience*, 67(4), 368-391. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- Irwin, M.; Wang, Z. 2017. Dynamic Systems Modeling. *The International Encyclopedia of Communication Research Methods* (eds J. Matthes, C.S. Davis and R.F. Potter), 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118901731.iecrm0074>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Global Warming of 1.5 °C*. 630p. Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 04 feb 2020
- Jamala, G. Y.; Mada, D. A.; Abraham, P.; Joel, L. 2013. Socio-Economic impact of desertification on rural livelihood in Ganye southeastern Adamawa State, Nigeria. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 7(3), 26-31. Disponível em: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jestft/papers/vol7-issue3/D0732631.pdf>
- Jardim, A. M. R. F.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, H. K. M. N.; Souza, M. S.; Araújo, G. G. L.; Moura, M. S. B. 2021a. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 188, 104464
- Jardim, A. M. R. F.; Santos, H. R. B.; Alves, H. K. M. N.; Ferreira-Silva, S. L.; Souza, L. S. B.; Araújo Júnior, G. N.; Souza, M. S.; Araújo, G. G. L.; Souza, C. A. A.; Silva, T. G. F. 2021b. Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 421-430
- Jardim, A. M. R. F.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Souza, M. S.; Morais, J. E. F.; Araújo Júnior, G. N. 2020. Multivariate analysis in the morpho-yield evaluation of forage cactus intercropped with sorghum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 756-761
- Jardim, A. M. R. F.; Araújo Júnior, G. N.; Silva, M. J.; Morais, J. E. F.; Silva, T. G. F. 2017. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 2, 186-193
- Jardim, A. M. R. F.; Silva, J. R.; Leite, M. L. M. V.; Teixeira, V. I.; Morato, R. P.; Araújo Júnior, G. N.; Silva, T. G. F. 2018. Symbiotic interaction in forage crop cultivations: A review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(1), 149-160
- Jordan, N. R.; Davis, A. S. 2015. Middle-Way Strategies for Sustainable Intensification of Agriculture. *BioScience*, 65(5), 513-519. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biosci/biv033>
- Kannan, N.; Anandhi, A. Water Management for Sustainable Food Production. *Water*, v.12, n.3, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030778>
- Kettenis, D. K. 1992. COSMOS: A simulation language for continuous, discrete and combined models. *Simulation*, 58(1), 32-41. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/003754979205800106>
- Kocur-Bera, K. 2019. Vulnerability of Rural Areas to Climate Change – Analysis of Similar Units in Terms of Spatial Conditions for Warmińsko-Mazurskie Voivodeship. *Journal of Ecological*

- Engineering, 20(6), 198–206. Disponível em: <https://doi.org/10.12911/22998993/109454>
- Khusanbayevich, I. S.; Ugli, M. S. K.; Zaripovich, K. Z. 2020. Modeling the absorption of nutrients by the roots of plants growing in a salted soil. *Journal of critical reviews*, 7(6), 452-455. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31838/jcr.07.06.80>
- Koohafkan, P.; Altieri, M. A.; Gimenez, E. H. 2012. Green Agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 10(1), 61-75. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14735903.2011.610206>
- Kuyper, T. W.; Struik, P. C. 2014. Epilogue: global food security, rhetoric, and the sustainable intensification debate. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8(10), 71-79. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.09.004>
- Lambin, E. F. 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 21(3). Disponível em: <https://doi.org/10.1177/030913339702100303>
- Law, A. 1991. Simulation model's level of detail determines effectiveness. *Industrial Engineering*, 23(10), 16-18
- Li, P.; Shi, K.; Wang, Y.; Kong, D.; Liua, T.; Jiaoa, J.; Liua, M. 2019. Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set. *Soil and Tillage Research*, 190(7), 31-40. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.019>
- Liu, Y.; Hu, X.; Zhang, Q.; Zheng, M. 2017. Improving agricultural water use efficiency: a quantitative study of Zhangye city using the Static CGE model with a CES water land resources account. *Sustainability*, 9(2), 1-15. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su9020308>
- Liu, L.; Basso, B. 2020. Linking field survey with crop modeling to forecast maize yield in smallholder farmers' fields in Tanzania. *Food Security*, 12, 537–548. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01020-3>
- Lima, L. R.; Silva, T. G. F.; Ferraz Jardim, A. M. R.; Souza, C. A. A. Queiroz, M. G.; Tabosa, J. N. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 113-118, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>
- Mancosu, N.; Snyder, R. L.; Kyriakakis, G.; Spano, D. 2015. Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, 7, 975-992. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Alves, L. M. 2016. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Climanálise*, 3(1), 1-6. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rc/limanl/revisita/pdf/30anos/marengoetal.pdf>
- Maria, A. 1997. Introduction to modeling and simulation. *Proceedings of the 1997 winter simulation conference proceedings*. ed. J.A. Joines, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick, p. 7-13, IEEE, Piscataway, NJ
- Mila, A. J.; Ali, H.; Akanda, A. R.; Rashid, H. O.; Rahman, A. 2017. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic return of sunflower. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1-14. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1287619>
- Mkhabela, M. S.; Bullock, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*. 110, 16–24. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>
- Morrison, K. D.; Kolden, C. A. 2015. Modeling the impacts of wildfire on runoff and pollutant transport from coastal watersheds to the nearshore environment. *Journal of Environmental Management*, 151, 113-123. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.02>
- Nawaz, A.; Farooq, M.; Lal, R.; Rehman, A.; Hussain, T.; Nadeem, A. 2017. influence of sesbania brown manuring and rice residue mulch on soil health, weeds and system productivity of conservation rice – wheat systems. *Land Degradation & Development*, 28, 1078–1090. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.2578>
- Nawaz, M. F.; Bourrié, G.; Trolard, F. 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291–309. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Nikulina, T. N.; Zhirnova, I. S.; Stupina, A. A. Zhirnov, A. A. 2019. Mathematical modeling of

- economic processes in complex systems (on the example of Krasnoyarsk municipality). *Journal of Physics: Conference Series*, 1353. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012118>
- Ochieng, J.; Kirimi, L.; Mathenge, M. 2016. Effects of climate variability and change on agricultural production: The case of small scale farmers in Kenya. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 77, p.71–78. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.005>
- Oliveira Filho, F. A., Thiago, F.; Bezerra, C.; Sandro, A. 2016. Eficiência agrônômica e biológica nos consórcios da mamoneira com. 729–736. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160087>
- Oyama, M. D.; Nobre, C.A. 2004. Climatic consequences of a large-scale desertification in northeast Brazil: A GCM simulation study. *Journal of Climate*, 17(16), 3203–3213. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2)
- Paltasingh, K. R.; Goyari, P.; Mishra, R. K. 2012. Measuring Weather Impact on Crop Yield Using Aridity Index: Evidence from Odisha. *Agricultural Economics Research Review*, 25(2), 205–216. Disponível em: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.137373>
- Pan Brasil. Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos hídricos, 2004
- Pareek, A.; Dhankher, O. P.; Foyer, C. H. 2020. Mitigating the impact of climate change on plant productivity and ecosystem sustainability. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 451–456. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz518>
- Parker, L.; Bourgoïn, C.; Martinez-Valle, A.; Läderach, P. 2019. Vulnerability of the agricultural sector to climate change: The development of a pan-tropical Climate Risk Vulnerability Assessment to inform sub-national decision making. *PLOS ONE*, 14(3), e0213641. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213641>
- Powell, J.; Reinhard, S. 2016. Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather and Climate Extremes*, 12, 69–79. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.02.003>
- Pretty, J.; Bharucha, Z. P. 2014. Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany*, 114(8), 1571–1596. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcu205>
- Queiroz, M. G.; Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S.; Souza, C. A. A.; Carvalho, H. F. S. 2016. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. *Irriga*, 1(1), 141–154. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- Ran, H.; Kang, S.; Li, F.; Du, T.; Tong, L.; Li, S.; Ding, R.; Zhang, X. 2018. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203, 438–450. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>
- Refeldt, M. J. H. A aplicação de modelos matemáticos em situações-problemas empresariais, com uso do software LINDO. 2009. 299f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2009
- Renato, N. S.; Sediya, G. C.; Silva, J. B. L.; Pereira, E. G. 2018. Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO2 elevados. *Revista de Ciências Agrárias*, 41, (4), 1067–1074. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19084/RCA18047>
- Rivett, P. 1980. Model building for decision analysis. New York: J. Wiley, 1980
- Robinson, S. 1997. Simulation Model Verification and Validation: Increasing the Users confidence, Winter Simulation Conference, 53–57. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/268437.268448>
- Rodrigues, T. M. F.; Senna, M. C. A.; Cataldi, M. 2019. Simulação dos impactos climáticos da desertificação do Nordeste brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(5), 1037–1047. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019164751>
- Rosa, S. L. K.; Souza, J. L. M.; Tsukahara, R. Y. 2020. Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.01238>
- Rosenzweig, C.; Elliott, J.; Deryng, D.; Ruane, A. C.; Müller, C. 2014. Assessing agricultural risks

- of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. PNAS, 111(9), 3268-3273. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Sambuichi, R. H. R.; Oliveira, M. A. C.; Silva, A. P. M.; Luedemann, G. 2012. A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)
- Safiullin, N. Z.; Safiullin, B. L. 2018. Static and dynamic models in economics. Journal of Physics: conference series, 1015(3). Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032117>
- Schlöter, M.; Nannipieri, P.; Sørensen, S. J.; Elsas, J. D. 2018. Microbial indicators for soil quality. Biology and Fertility of Soils, 54(1), 1–10. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>
- Shargui, Y.; Kochak, M.; Adeli, S. 2014. The effects of different soil irrigation on yield and its related traits in spring safflower cultivars in Iran. Advances in Environmental Biology, 8(9), 898-901
- Sharma, A.; Rana, C.; Singh, S.; Katoch, V. 2016. Soil salinity: causes, effects and management y cucurbits, in: PESSARAKLI, M. (Ed.), Hand - book of Cucurbits: Growth, Cultural Practices and Physiology. Taylor & Francis Group, New York, 419–440
- Shinozaki, K.; Uemura, M.; Bailey-Serres, J.; Bray, E. A.; Weretilny, E. 2015. Responses to Abiotic Stress Cap. 22. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L, Ed(s). Biochemistry & Molecular Biology of Plants, Wiley-Blackwell; 2, 711-767
- Silva, V. F.; Bezerra, C. V. C.; Nascimento, E. C. S.; Ferreira, T. N. F.; Lima, V. L. A.; Andrade, L. O. 2019. Production of chili pepper under organic fertilization and irrigation with treated wastewater. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 23(2), 84-89. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p84-89>
- Souza, M. S.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Jardim, A. M. R. F.; Araújo Júnior, G. N.; Alves, H. K. M. N. 2019. Practices for the improvement of the agricultural resilience of the forage production in semiarid environment: a review. Amazonian Journal of Plant Research, 3, 417-430
- Soares, D. B.; Mota Filho, F. O.; Nóbrega, R. S. 2011. Sobre o Processo de Desertificação. Revista Brasileira de Geografia Física, 4(1), 174-188. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i1.232699>
- Sodré, U. 2007. Modelos Matemáticos. Departamento de Matemática da Universidade Estadual de Londrina. Londrina-PR, 2007.
- SODRÉ, U. Modelos Matemáticos - UEL, 27p
- Souza, D. C. F.; Lima, I. S.; Santana, J. A.; Almeida, A. Q.; Gonzaga, M. I. S.; Santana, J. F. 2018. Zoneamento agroclimático da palma forrageira (*opuntia* sp.) para o estado de Sergipe. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 12(1), 2338-2347. Disponível em: <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n100715>
- Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Raes, D.; Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3), 426–437. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stefanoski, D. C.; Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Petter, F. A.; Pacheco, L. P. 2013. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 17(12), 1301–1309, Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S141543662013001200008>
- Struik, P. C.; Kuyper, T. W. 2017. Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. Agronomy for Sustainable Development, 37(8). 1-15. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>
- Sud, Y.C.; Molod, A. 1988. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall. Monthly Weather Review, 116(11), 2388-2400. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116%3C2388:AGSSOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116%3C2388:AGSSOT%3E2.0.CO;2)
- Sultan, B.; Guan, K.; Kouressy, M.; BIASUTTI, M.; Piani, C.; Hammer, G. L.; Mclean, G.; Lobell, D. B. 2014. Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. Environmental Research Letters, 9(10), 104006. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/17489326/9/10/104006>
- Sun, S.; Liu, J.; Wu, P.; Wang, Y.; Zhao, X.; Zhang, X. 2016. Comprehensive evaluation of water use in agricultural production: a case

- study in Hetao Irrigation District, China. *Journal of Cleaner Production*, 112(5), 4569-4575. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.123>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017, 888 p
- Tang, Z.; An, H.; Deng, L.; Wang, Y.; Zhu, G; Shangguan, Z. 2016. Effect of desertification on productivity in a desert steppe. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep27839>
- Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B. L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS*, 108(50), 260-264. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tucci, C. E. M. 2005. *Modelos Hidrológicos*. 2 ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Brasil
- Tuğrul, M. K. 2020. Soil Management in Sustainable Agriculture. *Sustainable Crop Production*. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.88319>
- Turban, E.; Wetherbe, J.; McLean, E. 2004. *Tecnologia da informação para gestão*. Porto Alegre. Editora:Bookman, 1ª edição, 660p
- UNFPA – UNITED NATIONS POPULATION FUND. 2011. *Relatório sobre a situação da população mundial*. Nova York: Fundo de População das Nações Unidas
- Verstraete, M. M.; Schwartz, S. A. 1991. Vegetation and Climate Interactions in Semi-arid Regions. *Vegetatio*, 91(1), 3-13
- Viola, E.; Franchini, M. 2012. Os limiares planetários, a Rio+20 e o papel do Brasil. *Cadernos EBAPE.BR*, 10(3), 470-491. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-39512012000300002>
- Wang, Q.; Huo, Z.; Zhang, L.; Wang, J.; Zhao, Y. 2016. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China. *Agricultural Water Management*, 163, 125-138. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.012>
- Wang, Q.; Zhang, D.; Zhou, X.; Liu, J.; Liu, Q.; Li, X.; Sample, D. J. 2019. Comparing yield, quality, water use efficiency, and value between fodder and grain produced using ridge-furrow rainwater harvesting in a semiarid region. *Crop Science*, 59(5), 2214-2226. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2019.03.0180>
- Wijitkosum, S. 2016. The impact of land use and spatial changes on desertification risk in degraded areas in Thailand. *Sustainable Environment Research*, 26(2), 84-92. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.11.004>
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin - American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/15200477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Wiley, R. W.; Rao, M. R. A. 1980. Competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture*, 16(2), 117-125. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0014479700010802>
- Yin, W.; Chai, Q.; Zhao, C.; Yu, A.; Fan, Z.; Hu, F.; Coulter, J. A. 2020a. Water utilization in intercropping: A review. *Agricultural Water Management*, 241, 2020a. 106335. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>
- Yin, W.; Yu, A.; Guo, Y.; Wang, Y.; Zhao, C.; Fan, Z.; Hu, F.; Chai, O. 2020b. Straw retention and plastic mulching enhance water use via synergistic regulation of water competition and compensation in wheat-maize intercropping systems. *Field Crops Research*, 229, 78-94. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.003>
- You, Y.; Zhou, N.; Wang, Y. 2021. Comparative study of desertification control policies and regulations in representative countries of the Belt and Road Initiative. *Global Ecology and Conservation*, e01577
- Zadoks, J. C.; Rabbinge, R. 1985. Modelling to a purpose. In: C.A. GILLIGAN, Ed., *Advances in Plant Pathology, Mathematical Modelling of Crop Disease*, Academic Press, London, 3, 231–244
- Zhang, P.; Wei, T.; Han, Q.; Ren, X.; Jia, Z. 2020. Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China. *Agricultural Water Management*, 241, 106382. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106382>