



# Tópicos Especiais em **Modelagem do Tempo, Clima e Sistema Terrestre**

Fernanda Casagrande  
Noele Franchi Leonardo  
Ana Carolina Nascimento Santos  
Helena Barbieri de Azevedo  
Regiane Moura  
(Organizadoras)



**AYA EDITORA**

**2024**

**Dra. Fernanda Casagrande**  
**Dra. Noele Franchi Leonardo**  
**Dra. Ana Carolina Nascimento Santos**  
**Dra. Helena Barbieri de Azevedo**  
**Dra. Regiane Moura**  
(Organizadoras)

# **Tópicos Especiais em Modelagem do Tempo, Clima e Sistema Terrestre**

**Ponta Grossa**  
**2024**

# Modelagem agrometeorológica: monitoramento, previsão e adaptação frente aos extremos climáticos

Minella Alves Martins

Erica Acioli Canamary

Ana Carolina Nascimento Santos

Javier Tomasella

## RESUMO

Apesar da bem reconhecida influência do clima na agricultura, a modelagem agrometeorológica é relativamente recente. Em diversas áreas da ciência, como meteorologia, agronomia e hidrologia, os modelos desempenham um papel crucial ao simular processos complexos por meio de estruturas matemáticas ou computacionais. A modelagem agrometeorológica desempenha, por sua vez, um papel fundamental ao simular o comportamento das culturas, ciclos de crescimento e respostas às condições ambientais, contribuindo tanto para a compreensão científica quanto para embasar a tomada de decisões. Neste contexto, o presente capítulo oferece uma análise abrangente do impacto dos elementos meteorológicos no crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas. Além disso, explora diversas categorias de modelos agrometeorológicos, enfatizando sua aplicação. A diversidade de aplicações se estende também à gestão de recursos hídricos e energéticos por meio da modelagem integrada agro-hidrológica. Além disso, o capítulo busca apresentar abordagens para enfrentar as principais limitações associadas à modelagem agrometeorológica.

## INTRODUÇÃO

Em diversos ramos da ciência como a meteorologia, agronomia e hidrologia, os modelos são uma forma de simplificar a realidade por meio de uma série de suposições e representações de processos (Van Ittersum e Donatelli, 2003). São ferramentas úteis por auxiliar na compreensão de diversos processos complexos ao simulá-los, podendo, inclusive, serem usados para auxiliar na estimativa de dados que são difíceis, caros ou complicados de medir (Pasquel *et al.*, 2022).

No caso da agricultura, uma das atividades econômicas mais suscetíveis a riscos, a modelagem vem a contribuir com conhecimento de impactos do clima e interações de fatores genéticos com o meio ambiente, complementando experimentos de campo (Pasquel *et al.*, 2022).



Estima-se que mais de 70% da produtividade agrícola seja impactada por variáveis climáticas, enquanto aproximadamente 30% da produtividade das culturas seja determinada por práticas de manejo agrícola (Sentelhas *et al.*, 2015). No entanto, estes valores variam a depender da cultura e da região avaliada (Vogel *et al.*, 2015).

Apesar da influência clima x agricultura ser bastante clara e conhecida há muito anos, a antecipação dos impactos do clima na produção agrícola ainda é um desafio. Isto porque a inter-relação entre as plantas e o ambiente envolve uma intrincada rede de processos físicos, químicos e biológicos. A análise conjunta de todos esses fatores é indispensável para um bom planejamento, monitoramento e análise de risco para a agricultura.

Neste contexto, a modelagem agrometeorológica surge para contribuir com o entendimento e antecipação dos impactos do clima na agricultura através de representações matemáticas e/ou computacionais que descrevam interações entre fatores climáticos e agrícolas. Esses modelos podem variar desde abordagens estatísticas até modelos de processos detalhados, buscando simular o comportamento das culturas, os ciclos de crescimento, as respostas a diferentes práticas de manejo e as influências do ambiente climático (Monteith e Unsworth, 2014). Através da modelagem, é possível simular cenários diversos e antecipar o comportamento das plantas diante de diferentes condições ambientais, contribuindo para uma melhor compreensão científica ou apoio à tomada de decisão (Jones *et al.*, 2017).

Considerando essa temática, o presente capítulo tem como propósito oferecer uma análise abrangente dos elementos de tempo e clima, explorando os efeitos que eles exercem sobre a produtividade agrícola. Adicionalmente, são apresentados os principais tipos de modelos agrometeorológicos, destacando a maneira pela qual a modelagem pode ser empregada como uma ferramenta decisiva. Essa aplicabilidade se estende não apenas ao setor agrícola, mas também à gestão de recursos hídricos, através da modelagem integrada agro-hidrológica. Ademais, o capítulo também busca apresentar abordagens para enfrentar as principais limitações associadas à modelagem agrometeorológica.

## **INTERAÇÃO ENTRE OS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

Os elementos meteorológicos que exercem impacto significativo sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal englobam a radiação solar, a temperatura do ar, a precipitação, o fotoperíodo, a umidade do ar e do solo, bem como a velocidade e direção do vento. Estas variáveis desempenham um papel crucial na determinação dos resultados agrícolas e têm sido extensivamente estudadas devido à sua influência direta e indireta nas interações complexas entre as plantas e o ambiente (Hoogenboom, 2000; Mavi e Tupper, 2004).

A quantidade e intensidade da radiação solar afetam a fotossíntese, o crescimento e a formação de frutos nas plantas. A deficiência de radiação solar pode resultar em crescimento limitado e menor produção.

A temperatura, além de influenciar a fotossíntese e o metabolismo vegetal, afeta uma série de outros processos nas plantas, incluindo a respiração de manutenção, a

transpiração, as fases fenológicas das culturas, a indução da floração, a composição de óleo nas sementes e a taxa de germinação das sementes (Pereira *et al.*, 2002; Mavi e Tupper, 2004). Essa gama de influências destaca a temperatura como a principal variável meteorológica a ser considerada nos estudos de zoneamento agroclimático, juntamente com a precipitação (Camargo *et al.*, 1977). Extremos de temperatura, como geadas ou ondas de calor, podem causar danos severos às plantas.

A precipitação é a principal fonte de umidade para o solo, principalmente para os cultivos de sequeiro. Baixa umidade do solo induz ao fechamento dos estômatos, reduzindo a fotossíntese, enquanto chuvas excessivas podem causar encharcamento e problemas de drenagem, reduzindo a oxigenação do solo e absorção de água pelas raízes. Ambos os extremos de disponibilidade hídrica reduzem a produtividade das culturas (Hoogenboom, 2000).

O fotoperíodo (horas de sol diárias exigida pela planta) é uma variável do ambiente que interfere tanto no crescimento quanto no desenvolvimento das culturas. No contexto do crescimento, o fotoperíodo corresponde ao tempo em que as plantas realizam o processo da fotossíntese. A adaptação de diferentes cultivares a determinadas regiões depende, além das exigências hídricas e térmicas, de sua exigência fotoperiódica (Farias *et al.*, 2021).

O vento afeta as culturas indiretamente, podendo ter impacto positivo ou negativo, dependendo de sua velocidade. De acordo com Pereira *et al.* (2002), em velocidades baixas a moderadas, o vento contribui para renovar o suprimento de CO<sub>2</sub> e manter a transpiração das plantas. No entanto, em velocidades excessivas, o vento aumenta a transpiração das plantas, levando ao fechamento dos estômatos, redução das folhas e área foliar, resultando em queda abrupta da fotossíntese.

Por fim, a umidade do ar influencia a taxa de evaporação e regula a transpiração das plantas. Além disso, a umidade do ar desempenha um papel crucial na interação entre as plantas e microorganismos, notadamente fungos e bactérias causadores de doenças, podendo favorecer o surgimento de doenças (Sentelhas, 2004).

## TIPOS DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS

Um modelo é uma representação esquemática da concepção de um sistema (Mavi e Tupper, 2004). Os modelos agrometeorológicos são modelos agrícolas (*crop models*) que representam a influência das variáveis meteorológicas nos sistemas agrícolas, mas podem associar outras variáveis de interesse, como por exemplo, características específicas da planta, propriedades físico-hídricas e ciclo de nutrientes no solo, as práticas de manejo da cultura, a incidência de pragas e doenças. A complexidade de cada modelo depende do objetivo que se almeja e das variáveis disponíveis para simulação. No entanto, é importante ter em mente que, como trata-se de uma representação simplificada da realidade, todo modelo contém limitações e erros inerentes aos processos simulados.

De forma geral, os modelos podem ser classificados em modelos estatísticos e modelos de simulação dinâmica (Mavi e Tupper, 2004).

Os modelos estatísticos, também conhecidos como modelos empíricos, relacionam

alguma variável ou fenômeno meteorológico com alguma componente agrícola, como por exemplo, a produtividade final da cultura. Eles dependem principalmente de técnicas estatísticas, como correlação ou regressão e não exigem informações detalhadas sobre a fenologia da planta.

Os modelos estatísticos são capazes de reconhecer os anos em que se pode esperar safras excepcionais e aqueles onde é provável uma frustração nas colheitas, desde que o clima em questão esteja dentro da normalidade. Apesar da sua simplicidade e relação direta entre a produtividade e um ou mais fatores ambientais, não são suficientemente precisos para serem usados em outras regiões e condições ambientais diferentes daquelas para as quais foram ajustados (Jones *et al.*, 2017).

Um exemplo de modelo agrometeorológico estatístico é apresentado por Aparecido *et al.* (2020). Estes autores utilizaram regressão linear múltipla (equação 1) para prever a produtividade da soja no Mato Grosso do Sul.

$$Y = CL + aX1 + bX2 + cX3 + dX4 + eX5 + e \quad (1)$$

Este modelo, relaciona Y, a produtividade da soja (sacas por hectare) com variáveis independentes X1, X2, X3, X4 e X5, que podem ser as variáveis climáticas selecionadas. Os coeficientes a, b, c, d e e são os parâmetros do modelo (pesos), CL é o coeficiente linear (termo constante) e  $\epsilon$  é o erro aleatório. Neste estudo, Aparecido *et al.* (2020) utilizaram as variáveis climáticas: temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) - T, precipitação (mm) - P, evapotranspiração potencial (mm) - ETP, déficit hídrico - DEF e excesso hídrico (mm) - EXC. Inúmeros modelos foram gerados para cada região do estado do Mato Grosso do Sul (norte, central e sul), sendo selecionado o modelo com a maior precisão para cada uma das regiões. A tabela 1 apresenta os 3 modelos selecionados. Observa-se que, em cada região um conjunto de variáveis meteorológicas foi mais adequado para explicar a variação da produtividade de soja.

**Tabela 1 - Modelos estatísticos calibrados para estimar a produtividade de soja no estado do Mato Grosso do Sul.**

Regiões	Modelos	Previsão (meses)
Norte	$Y = 0.029 * P_{DEZP} - 0.245 * ETR_{NOVP} - 0.252 * ETR_{JANC} + 0.028 * EXC_{JANC} + 82.461$	2
Centro	$Y = 0.0214 * P_{JANC} - 0.290 * ETP_{DEZP} - 0.012 * ETR_{JANC} + 0.0183 * EXC_{DEZP} + 63.91$	2
Sul	$Y = 0.056 * P_{DEZP} - 0.045 * EXC_{NOVP} - 0.035 * EXC_{JANC} + 0.053 * EXC_{FEVC} + 39.817$	1

**Fonte: adaptado de Aparecido *et al.* (2020)**

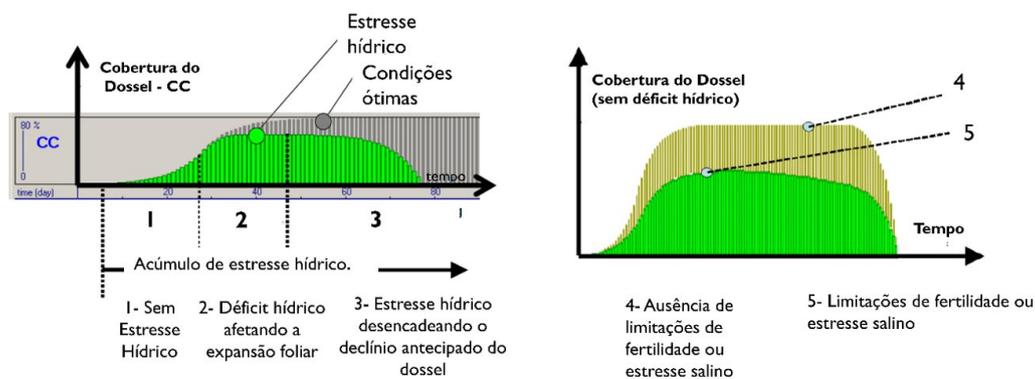
Interessante notar que, cada modelo foi capaz de antecipar a produtividade em tempos diferentes. Isso é decorrente da previsibilidade de cada região atrelada às variáveis meteorológicas selecionadas em cada modelo. Este modelo foi eficiente para prever a produtividade da soja nas porções norte e centro do estado com 2 meses de antecedência. Um período essencial para que os produtores possam realizar o planejamento pré e pós-colheita (Aparecido *et al.*, 2020).

Em contraste aos modelos estatísticos, os modelos de simulação dinâmica, também conhecidos como mecanicistas, dependem da modelagem de processos biofísicos (Pasquel *et al.*, 2022). Eles se baseiam em equações matemáticas que descrevem o processo de desenvolvimento e crescimento das plantas, impulsionados pelo clima. Além disso, é possível incluir a simulação e efeitos dos nutrientes no solo, do manejo e da dinâmica da água no crescimento das plantas (Basso e Liu, 2019).

Em outras palavras, estes modelos visam simular interações entre o solo-planta-atmosfera-manejo (Hoogenboom, 2000). Para alcançar isso, abordagens multidisciplinares são necessárias e os modelos de cultivo podem levar em consideração componentes biológicos, fisiológicos, ecológicos, físicos e econômicos (Pasquel *et al.*, 2022). A integração dessas abordagens na modelagem levou ao desenvolvimento de inúmeros modelos de cultivo como os diversos modelos da família DSSAT (Boote *et al.*, 2019), APSIM (Holzworth *et al.*, 2014), WOFOST (De Wit *et al.*, 2019), AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009), dentre inúmeros outros.

Uma vez que estes modelos representam o desenvolvimento da cultura, eles fornecem informações mais detalhadas que os modelos estatísticos. No entanto, quanto mais acurado um modelo dinâmico, mais informações são necessárias para simulação. Na figura 1 é apresentado um desenho esquemático da simulação de desenvolvimento de uma cultura hipotética, na qual é possível notar os efeitos do estresse hídrico e de fertilidade do solo.

**Figura 1 – Simulação do desenvolvimento do dossel de uma cultura hipotética mostrando o comportamento sem estresse hídrico (1) e com estresse hídrico (2 e 3) sem estresse de fertilidade no solo (4) e com limitações nutricionais e excesso de salinidade.**



Fonte: adaptado de Raes *et al.* (2018)

Interessante notar que, nas simulações dinâmicas, é possível avaliar as componentes agrícolas no decorrer de toda a safra. Nestes exemplos apresentados nas figura 1, é possível acompanhar o desenvolvimento do dossel e o exato momento no decorrer da safra onde iniciou-se o estresse hídrico e impactos da deficiência nutricional.

Outras características que distinguem muitos modelos são suas escalas de simulação. Em se tratando de escala espacial, a maioria dos modelos agrometeorológicos são modelos pontuais, ou seja, simulam a nível de uma pequena área, talhão ou uma fazenda. Por sua vez, eles não levam em consideração dados ou efeitos de áreas vizinhas. Por outro lado, diversas ferramentas e adaptações têm sido desenvolvidas para permitir

que tais modelos simulem de forma espacial, ou seja, considerem grandes áreas para simulação e levem em consideração a variabilidade espacial das variáveis de entrada e produza variáveis de saída considerando tal variabilidade. No caso do modelo AquaCrop, a ferramenta AquaCrop GIS (Lorite *et al.*, 2013), apesar de não se tratar de simulação espacial, permite que as simulações pontuais sejam exibidas em um Sistema de Informações Geográficas (GIS). Mais recentemente, uma adaptação do AquaCrop para a linguagem Fortran foi desenvolvida para permitir simulações espaciais e de longos períodos (Tomasella *et al.*, 2023).

Em termos de escala temporal, as variáveis, principalmente as meteorológicas, podem ser diárias, decendiais, quinzenais, mensais ou mesmo por ciclo da cultura. Cada tipo de modelo requer ou permite simulações em diferentes escalas temporais, sendo a diária a mais recomendada. Tais informações podem ser provenientes de dados observados, no entanto, nos últimos anos, tem sido muito frequente o uso de informações provenientes de modelos climáticos, sejam elas da previsão de tempo, de clima na escala sazonal ou subsazonal e projeções climáticas.

Dessa forma, a depender do tipo de modelo e das escalas espacial e temporal utilizadas, é possível determinar a melhor aplicação.

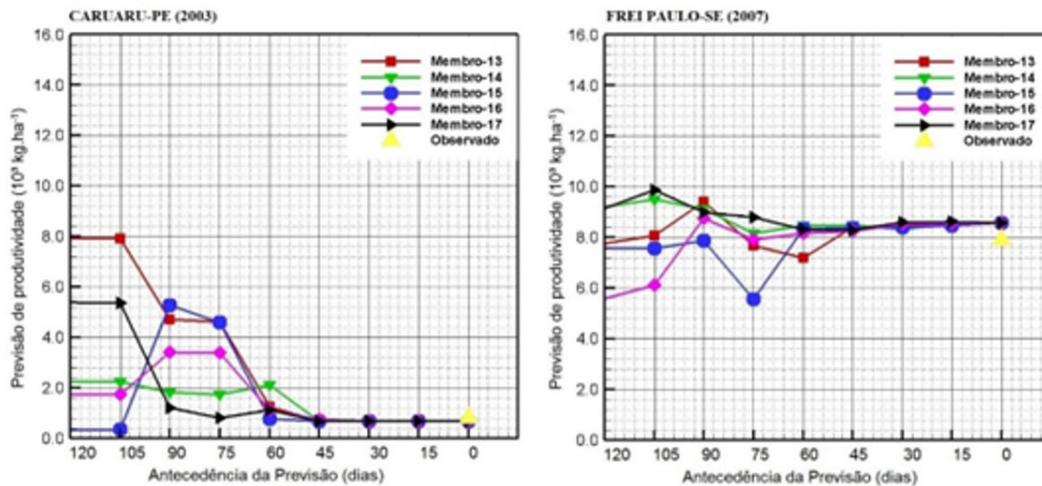
## APLICAÇÕES DA MODELAGEM AGROMETEORÓLOGICA

Dentre as diversas aplicações da modelagem agrometeorológica, o trabalho de Soler *et al.* (2007) utiliza o modelo CERES-MAIZE para prever produtividade de milho safrinha. Estes autores relataram boa previsibilidade com antecedência de 45 dias, além de relacionar a produtividade com variabilidades climáticas como El Niño Oscilação Sul – ENOS.

Outra aplicação foi apresentada por Martins *et al.* (2018). Estes autores demonstraram a viabilidade de compor um Sistema de Previsão sazonal de Produtividade de milho na região Nordeste do Brasil, com uso do modelo AquaCrop com dados históricos e previsão climática sazonal do modelo Eta (Chou *et al.*, 2005). A figura 2 exemplifica as previsões para Caruaru - PE e Frei Paulo - SE.

Apesar de no início da safra os membros apresentarem alta variabilidade, à medida que a estação de crescimento progride e mais observações se tornaram disponíveis, a produtividade prevista rapidamente converge para a produtividade observada. De forma geral, valores muito próximos aos observados na colheita foram previstos pelo modelo com 60 dias de antecedência. Este estudo de caso traz ainda uma questão interessante por se tratar de um ano muito seco (2003) e um ano muito chuvoso (2007), sendo possível também avaliar a sensibilidade do modelo a estações chuvosas atípicas.

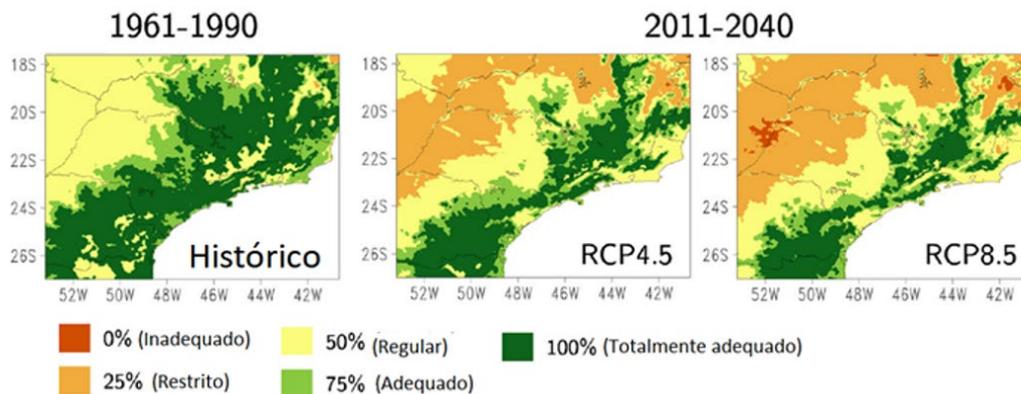
**Figura 2 - Simulação de um sistema de previsão climática sazonal para o milho em Caruaru -PE (2003) e Frei Paulo-SE (2007) utilizando o modelo AquaCrop e com previsões sazonais do modelo Eta.**



Fonte: adaptado de Martins *et al.* (2018)

Considerando uma escala de tempo de longo prazo, Tavares *et al.* (2017) elaboraram um Zoneamento Agroclimático - ZA do café Arábica na região Sul de Minas Gerais, considerando projeções climáticas do modelo regional Eta. O estudo mostra que as áreas adequadas para produção de café tendem a reduzir de 20 a 60% das áreas atualmente adequadas para o cultivo de café no Sudeste do Brasil (figura 3). Além disso, áreas de alto risco climático aumentam devido ao aumento da temperatura, resultando em quedas de produtividade cerca de 25% até o final do século XXI.

**Figura 3 - Zoneamento Agroclimático da cultura do café no Sul de Minas Gerais.**



Fonte: adaptado de Tavares *et al.* (2017)

Este tipo de abordagem vem sendo cada vez mais utilizada na modelagem agrometeorológica com a finalidade de avaliar impactos e riscos das mudanças climáticas em diferentes culturas agrícolas e propor medidas de adaptação que sejam eficientes na redução dos danos. Outros exemplos dessa abordagem podem ser consultados em Asseng *et al.* (2015), Boonwichai *et al.* (2019), Martins *et al.* (2019).

## Modelagem integrada agro-hidrológica

Os impactos das mudanças globais, sejam elas relacionadas ao clima ou a padrões de vida em sociedade, tem colocado pressão sobre o uso de recursos naturais. Sendo a

agricultura um dos maiores consumidores de água, entender o impacto das retiradas de água para suprimento agrícola e seu impacto na vazão dos rios é primordial para garantir sustentabilidade na produção de alimentos e de outros usos, como abastecimento público/industrial, geração de energia e manutenção dos ecossistemas aquáticos e terrestres associados. Esses diferentes interesses passam a ser conflitantes em situações de escassez hídrica, quando a água deve prioritariamente ser destinada ao consumo humano e animal, segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997), justificando, muitas vezes, a imposição de restrições as demais atividades.

Além da gestão desses múltiplos interesses, é importante verificar a melhor escala para análise do problema. Mesmo que os modelos agrometeorológicos possam ser integrados a ferramentas de informações geográficas para permitir uma análise discretizada do espaço, a unidade básica para análise dos processos hidrológicos é a bacia hidrográfica, sendo fundamental a identificação das suas fronteiras.

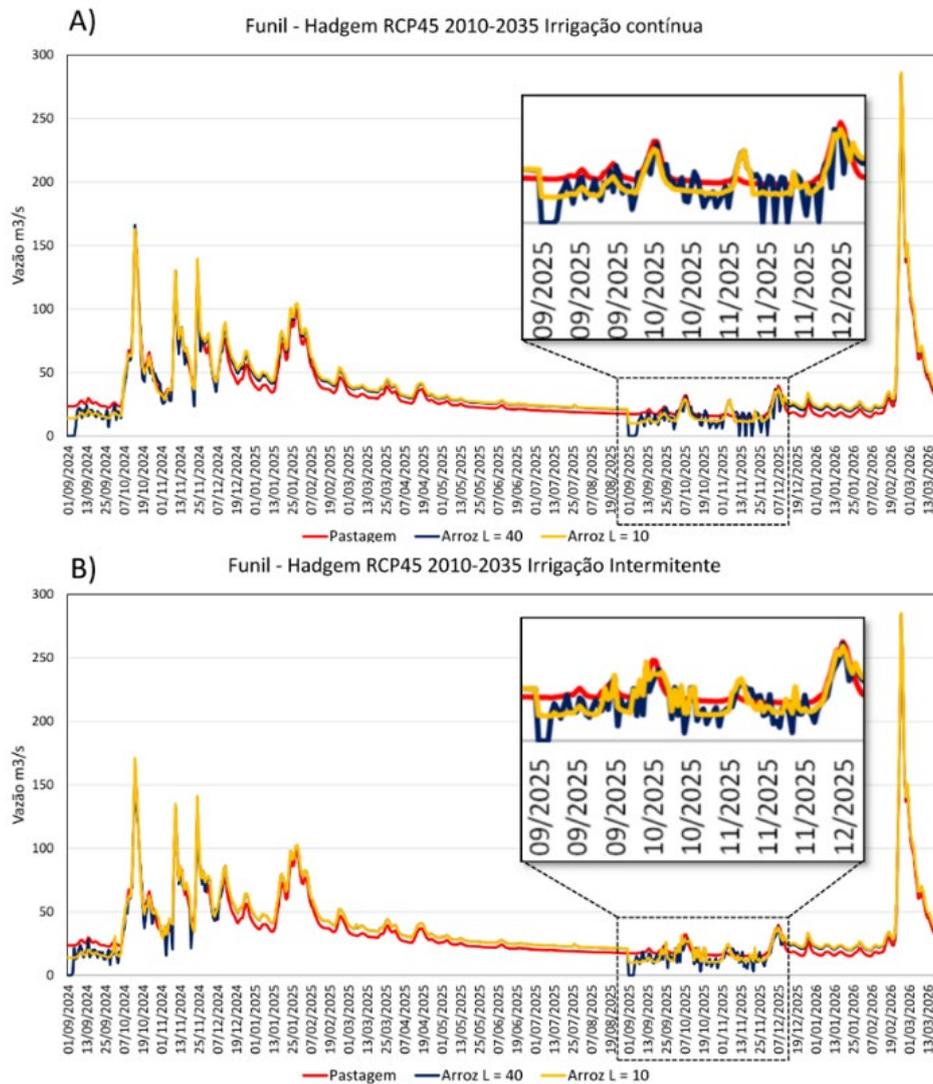
Uma das formas de considerar interações complexas entre esses múltiplos componentes é com uso de modelagem integrada. Diversos modelos podem ser integrados a fim de se contabilizar um número maior de variáveis. Para análise da questão de uso de água e produção de alimentos, pode ser utilizado a modelagem agrometeorológica integrada à modelagem hidrológica. Este tipo de acoplamento visa, além de focar no sistema agrícola, subsidiar a gestão de recursos hídricos e energéticos.

Uma abordagem mais recente que fundamenta a proposição de ferramentas e metodologias destinadas a gestão de múltiplos recursos é conhecida como *nexo água, energia e alimentos*. Essa nova perspectiva tem como princípio básico a identificação das possíveis conexões existentes entre esses recursos, sejam elas de compensação ou de competição, sinergias e *trade-offs*. Diversos exemplos de modelagem integrada no âmbito da abordagem *nexo* foram propostos, com diferentes níveis de complexidade, como por ser visto em Amjath-Babu *et al.* (2019) e Vinca *et al.* (2020).

No Brasil, a resolução espacial em grade celular também possibilitou o acoplamento do modelo agrícola AquaCrop (Tomasella *et al.*, 2023), com o modelo hidrológico distribuído MHD-INPE (Rodriguez e Tomasella, 2016). Essa integração foi realizada para avaliar o impacto dos processos de uso e ocupação do solo, de mudanças climáticas e de políticas de uso da água na disponibilidade hídrica futura da bacia do rio Paraíba do Sul (Canamary *et al.*, 2023). Essa região está situada entre os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais e localiza duas transposições que garantem a manutenção da segurança hídrica das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. Essa integração de modelos permitiu, portanto, a composição de cenários a partir da combinação de projeções de ampliação do serviço de abastecimento e do nível de consumo de água, além de cenários de irrigação da cultura de arroz (Martins *et al.*, 2023), inundação contínua e intermitente, maior demanda agrícola da região estudada.

Um exemplo de simulação realizada com essa ferramenta, mostra o impacto de diferentes estratégias de irrigação na vazão afluente a usina hidrelétrica do Funil (figura 4), cuja capacidade instalada é de 216 MW, uma das maiores da região.

**Figura 4 - Simulação da vazão afluyente ao reservatório do Funil na bacia do rio Paraíba do Sul para diferentes estratégias de irrigação de arroz usando diferentes lâminas de reposição. A) irrigação contínua e B) irrigação intermitente.**



Fonte: Autoria Própria (2023)

As simulações consideram os dados climáticos do modelo Eta-HadGEM2-ES e o cenário RCP 4.5 de emissões de gases do efeito estufa. Comparou-se o impacto nas vazões do Rio Paraíba do Sul ao considerar a região plantada com pastagem e arroz. Para o arroz duas estratégias de irrigação foram utilizadas: contínua (mantendo a lâmina de água na superfície a 8 cm) e intermitente (sem manutenção de lâmina acima da superfície). Para cada uma delas testou-se diferentes reposições de água, reposição de 40 mm (L=40) e reposição de 10 mm (L=10).

A figura 4 mostra que, as simulações considerando a cultura do arroz tem períodos concentrados de irrigação que, em anos secos, resulta em colapso na vazão do rio, por exemplo, ao considerar L=40 e irrigação contínua (figura 4A). Ao reduzir a lâmina de reposição para L=10, a irrigação contínua reduz o impacto na vazão do rio, no entanto, ainda contribui para sua manutenção em valores baixos durante toda o período de irrigação (figura 4A). Por outro lado, ao considerar L=10 e irrigação intermitente (figura 4B), tem-se um impacto mais equilibrado na vazão do rio. Apesar da vazão oscilar durante o período de irrigação, os valores são ligeiramente superiores à irrigação contínua com a mesma lâmina de irrigação.

Vale ressaltar que, as diferentes estratégias de irrigação resultaram em variações pouco significativas do ponto de vista de produtividade agrícola (Martins *et al.*, 2023). Em contrapartida, do ponto de vista de gestão de recursos hídricos, tais simulações mostram que, estratégias de irrigação mais eficientes podem ser a resposta para períodos de escassez hídrica. Estes resultados servem como subsídio à gestão de recursos hídricos e energéticos na Bacia, a fim de otimizar os usos de água e evitar comprometimento no suprimento hídrico para os diferentes usuários.

## LIMITAÇÕES E DESAFIOS

Frente a todas as vantagens e possibilidades de aplicação da modelagem agrometeorológica, é preciso destacar algumas limitações, que vão desde a calibração de parâmetros da cultura até obtenção de dados meteorológicos observados e a falta de uma eficiente interação modelo-usuário final.

A parametrização dos modelos agrometeorológicos requer informações detalhadas de culturas desenvolvidas em ambientes controlados sob influência de condições ambientais ótimas, suprimento hídrico e nutricional adequados e livres de pragas e doenças. No Brasil, estes experimentos são, em sua maioria, desenvolvidos por universidades e institutos de pesquisa. No entanto, nem sempre é fácil encontrar tais dados no detalhamento requerido pelo modelo. Por exemplo, na maioria dos experimentos de campo são feitas medidas de produtividade final, mas raramente são feitas medidas de biomassa, crescimento do dossel, índice de área foliar, dentre outras variáveis que são imprescindíveis na calibração dos modelos. Para substituir os dados experimentais, tem sido utilizado dados de sensoriamento remoto, seja por meio de fotografias aéreas por drones para estimativa da área foliar (Liu *et al.*, 2019, Martins *et al.*, 2023), seja por meio de imagens de satélite para estimar o acúmulo de biomassa no decorrer do desenvolvimento da cultura (Ndikumana *et al.*, 2018, Martins *et al.*, 2023).

Outro aspecto que constitui uma limitação à modelagem agrometeorológica é a indisponibilidade de dados meteorológicos provenientes de uma rede com boa densidade de estações. Segundo Sentelhas (2012) este fator torna as simulações pouco abrangentes e pouco confiáveis. A necessidade de uma boa estrutura observacional é imprescindível para a simulação e há regiões no Brasil em que a densidade de estações de observações é muito baixa, comprometendo os resultados, principalmente quando há necessidade de interpolar dados. Aliado à questão da baixa densidade de estações meteorológicas, inclui-se as falhas das séries históricas existentes, tanto de dados climatológicos, quanto de dados de solos. No caso da precipitação, que talvez seja a variável mais importante na simulação agrometeorológica, uma alternativa é o uso de produtos que unem diferentes bases de dados, como por exemplo dados do MERGE (Rozante *et al.*, 2020), WorldClim (Fick e Hijmans, 2017) e CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) (Funk *et al.*, 2015).

No caso de dados de solo, é possível consultar o levantamento de perfis de solo do Projeto Radam-Brasil (Radam-Brasil, 1981) e o *SoilGrids* (Poggio *et al.*, 2021), com dados disponíveis para todo globo. No entanto, estes bancos de dados possuem informações

de propriedades físicas do solo, sendo necessário, na maioria dos modelos, informações de propriedades hídras do solo. Tais informações podem ser obtidas por estimativas por meio de funções de pedotransferência, conforme detalhado por Ottoni *et al.* (2019).

Apesar da modelagem climática ter evoluído bastante nos últimos tempos, sabe-se que os modelos apresentam destrezas diferentes em diferentes regiões. Portanto, algumas áreas são passíveis de maiores erros que outras, dependendo da dificuldade que os modelos têm de representar o estado da atmosfera. Dessa forma, a acurácia das previsões de curto e médio prazo configuram um grande desafio para modelagem agrícola. Como forma de contornar tal limitação, tem sido utilizadas técnicas de correção de viés de tais modelos. Isso evita que erros sistemáticos da modelagem climática sejam propagados na modelagem agrícola. Detalhes sobre o uso de algumas destas técnicas de correção de viés podem ser vistos em Bardossy e Pegram (2011) e Oliveira *et al.* (2015). Além disso, o uso de previsão climática subsazonal, ainda pouco utilizado no Brasil, deve ser avaliado como uma forma de melhorar a antecipação dos fenômenos meteorológicos e seus impactos.

Por fim, mas não exaurindo todas as limitações, é importante salientar as limitações inerentes ao uso dos modelos agrometeorológicos e das informações geradas por eles. A modelagem agrometeorológica é uma ferramenta eficaz, considerada uma forma eficiente de transmitir os resultados da pesquisa para agricultores e profissionais que trabalham na área agrícola (Moreto, 2020; Zhao *et al.*, 2019). No entanto, segundo Archontoulis e Licht (2016), estes modelos têm sido utilizados muito mais para fins de pesquisa do que para abordar questões práticas (do dia a dia), como por exemplo, para subsídio à agricultura de precisão. Neste caso, há uma limitação visível na transferência de informações da academia para o usuário final. Os modelos aqui tratados podem ser adaptados para uso em diversas instâncias, na academia para pesquisas científicas, mas também para o produtor dentro de sua fazenda, com uma interface intuitiva e amigável.

Assim, para disseminar o uso de tais modelos, é imprescindível que haja uma intermediação entre as duas pontas (o desenvolvedor do modelo e o usuário final).

Neste sentido, a comunicação científica, assim como o papel da extensão universitária e extensão rural seria importante para fazer essa “ponte” e tornar o conhecimento “utilizável” para sanar problemas, não somente do ponto de vista científico, mas principalmente, os problemas que ocorrem no âmbito da fazenda.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos agrometeorológicos são ferramentas importantes no apoio à tomada de decisão, tanto para subsidiar as políticas governamentais, como para inovar na criação de políticas de gerenciamento dos riscos e alerta precoce, tornando a sociedade preparada para enfrentar os efeitos da seca e ainda fazendo as comunidades mais resilientes aos impactos.

Tendo em vista as projeções de mudanças no clima e estimativas de aumento de demanda hídrica, principalmente por parte do setor agrícola, a modelagem integrada será cada vez mais importantes como ferramenta para avaliar estratégias mais eficientes de

irrigação, que não conflitam com a geração de energia e demais usos.

Além das aplicações aqui exemplificadas, diversas outras são possíveis com uso de modelos agrometeorológicos em suas diversas escalas temporais e espaciais. Modelos agrometeorológicos têm sido utilizados em conjunto com sensoriamento remoto e, mais recentemente, com técnicas de redes neurais, aprendizado de máquina e inteligência artificial, o que tem contribuído para melhorar o desempenho das simulações.

A escolha do modelo a ser utilizado deve sempre partir do objetivo que se deseja alcançar e dos dados disponíveis para simulação. Considerar as limitações inerentes à modelagem é mandatório, principalmente para subsídios à tomada de decisão. Por fim, conhecer e antecipar os riscos que afetam a produção agrícola e poder avaliar as possibilidades de enfrentamento são as maiores vantagens ao utilizar a modelagem agrometeorológica.

## REFERÊNCIAS

AMJATH-BABU, T. S., SHARMA, B., BROUWER, R., RASUL, G., WAHID, S. M., NEUPANE, N., BHATTARAI, U., SIEBER, S. Integrated modelling of the impacts of hydropower projects on the water-food-energy nexus in a transboundary Himalayan River basin. **Applied Energy**, 239, 494–503. 2019.

ARCHONTOULIS, S; LICHT, M. Crop Modeling Has Answers for Real-life Problems. 2016. Disponível em: <https://www.extension.iastate.edu/news/crop-modeling-has-answers-real-life-problems>. Acesso em 04 Set 2023.

ASSENG, S., ZHU, Y., WANG, E., ZHANG, W. Crop modeling for climate change impact and adaptation. **Crop Physiology**, 505–546. 2015.

APARECIDO, L. E. O, TORSONI, G. B., DA SILVA CABRAL DE MORAES, J. R., DE MENESES, K. C., LORENÇONE, J. A., LORENÇONE, P. A. Modeling the impact of agrometeorological variables on soybean yield in the Mato Grosso Do Sul: 2000–2019. **Environment, Development and Sustainability**. 2020.

BARDOSSY, A., PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resour. Res.** 47. 2011.

BASSO, B.; LIU, L. Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies. **Advances in Agronomy**. 2019.

BOONWICHAI, S., SHRESTHA, S., BABEL, M.S., WEESAKUL, S., DATTA, A. Evaluation of climate change impacts and adaptation strategies on rainfed rice production in Songkhram River Basin, Thailand. **Sci. Total Environ.** 652, 2019.

BOOTE, K.J. (Ed.). **Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture**. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom. 2019.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF 09/01/1997, P. 470. 1997.

- CAMARGO, A. P.; ALFONSI, R. R., PINTO, H. S.; CHIARINI, J. V. Zoneamento de aptidão climática para culturas comerciais em áreas de cerrado. In: IV Simpósio sobre o Cerrado: bases para a utilização agropecuária. **Anais**. Coord. MG. Ferri, Belo Horizonte, Ed. Itatiaia, São Paulo, EDUSP, 1977, p.89-105.
- CANAMARY, E. A., TOMASELLA, J., MARCHEZINI, V., PAIVA, A. C. E., MARTINS, M. A.; SILVA, D. DE M. Segurança Hídrica e Energética na Bacia do Paraíba do Sul Diante das Mudanças Climáticas. In **Anais IV SRHPS - Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul 2023**.
- CHOU, S.C., BUSTAMANTE, J.F., GOMES, J.L. Evaluation of eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Process Geophys.** 2005.
- DE WIT, A., BOOGAARD, H., FUMAGALLI, D., JANSSEN, S., KNAPEN, R., VAN KRAALINGEN, D., *et al.* 25 years of the WOFOST cropping systems model. **Agricultural Systems**, 168, 154–167. 2019.
- FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. Fotoperíodo. Embrapa Soja. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/exigencias-climaticas/fotoperiodo>. Acesso em 05 Set 2023.
- FICK, S.E., HIJMANS, R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **Int J Climatol** 37(12):4302–4315. 2017.
- FUNK, C., PETERSON, P., LANDSFELD, M., PEDREROS, D., VERDIN, J., SHUKLA, S., HUSAK, G., ROWLAND, J., HARRISON, L., HOELL, A., MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Sci Data** 2:150066. 2015.
- HOLZWORTH, D. P., HUTH, N. I., DEVOIL, P. G., ZURCHER, E. J., HERRMANN, N. I., MCLEAN, G., *et al.* APSIM—Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, 62, 327–350. 2014.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1–2), 137–157. 2000.
- JONES, J. W., ANTLE, J. M., BASSO, B., BOOTE, K. J., CONANT, R. T., FOSTER, I., *et al.* Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**. 2017.
- LIU, J.; PATTEY, E.; ADMIRAL, S. Assessment of in situ crop LAI measurement using unidirectional view digital photography. **Agricultural and Forest Meteorology**. 2019.
- LORITE, I. J., GARCÍA-VILA, M., SANTOS, C., RUIZ-RAMOS, M., FERERES, E. AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. **Computers and Electronics in Agriculture**. 2013.
- MARTINS, M. A., TOMASELLA, J., BASSANELLI, H. R., PAIVA, A. C. E., VIEIRA, R. M. S. P., CANAMARY, E. A., ALVARENGA, L. A. On the sustainability of paddy rice cultivation in the Paraíba do Sul River basin (Brazil) under a changing climate. *Journal of Cleaner Production*, 386. 2023.

- MARTINS, M. A., TOMASELLA, J., AND DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian northeast: impacts and adaptation. **Agric. Water Manag.** 2019.
- MARTINS, M. A., TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A., ALVALÁ, R. C. S., GIAROLLA, A., GAROFOLO, L. L., *et al.* Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agric. Syst.** 160, 21–30. 2018.
- MARVI, H.S.; TUPPER, G.J. **Agrometeorology Principles and Applications of Climate. Studies in Agriculture**, Food Products Press, New York. 2004.
- MONTEITH, J.L; UNSWORTH, M.H. **Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere.** Fourth Edition. Academic Press. 2014.
- MORETO, V.B. **Modelagem para auxiliar na otimização do sistema “climate-smart-agriculture” para cultivo de cana-de-açúcar.** Jaboticabal. 2020. Tese (doutorado). UNESP.
- NDIKUMANA, E., MINH, D.H.T., NGUYEN, H. T.D. *et al.* Estimation of Rice Height and Biomass Using Multitemporal SAR Sentinel-1 for Camargue, Southern France. **Remote Sensing**, 10(9), 1394. 2018.
- OLIVEIRA, G.G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N.M.R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo Eta CPTec/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, 101 – 121. 2015.
- OTTONI, M. V., FILHO, T. B. O., LOPES-ASSAD, M. L. R. C., FILHO, O. C. R. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**. 2019.
- PASQUEL, D.; ROUX, S.; RICHETTI, J.; CAMMARANO, D., TISSEYRE, B; TAYLOR, J.A. A review of methods to evaluate crop model performance at multiple and changing spatial scales. **Precision Agriculture**. 23:1489–1513. 2022.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- POGGIO, L., DE SOUSA, L. M., BATJES, N. H., HEUVELINK, G. B. M., KEMPEN, B., RIBEIRO, E., AND ROSSITER, D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, **SOIL**, 7, 217–240, 2021.
- RADAM-BRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais.** Rio de Janeiro: IBGE. 1981.
- RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T. C., AND FERERES, E. AquaCrop reference manual, AquaCrop version 4.0. Rome, Italy: FAO. 2018.
- RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 10, p. 1831–1846, 2016.
- ROZANTE, J. R., GUTIERREZ, E. R., FERNANDES, A. DE A., VILA, D. A. Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations. **International Journal of Remote Sensing**, 41(19), 2020.

SENTELHAS, P., BATTISTI, R., CÂMARA, G., FARIAS, J., HAMPF, A., NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, 153(8). 2015.

SENTELHAS, P.C. Uso de modelos de simulação de culturas como ferramentas para identificação dos agentes deflagradores de colapso na produção agrícola. Apresentação da III Reunião Técnica do CEMADEN. Fortaleza. 2012. Disponível em < <http://www.cemaden.gov.br/apresentacoes/IIIrtdocemaden.php>. Acesso em 25 Ago 2023.

SENTELHAS, P.C. **Duração do período de molhamento foliar: aspectos operacionais na sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do modelo de Pernman-Motheith**. Piracicaba, São Paulo. 2004.

SOLER, C. M. T., SENTELHAS P. C. AND HOOGENBOOM G. Application of the CSM-CERES-661 Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-662 season in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy** 27(2-4), 165-77. 2007

STEDUTO, P., HSIAO, T. C., RAES, D., FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, 101(3), 426–437. 2009.

TAVARES, P. da S., GIAROLLA, A., CHOU, S. C., SILVA, A. J. DE P., LYRA, A. DE A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. *Regional Environmental Change*, 18(3), 873–883. 2017.

TOMASELLA, J., MARTINS, M.A. AND SHRESTHA, N. An open-source tool for improving on-farm yield forecasting systems. **Front. Sustain. Food Syst.** 2023.

VAN ITTERSUM, M. K., DONATELLI, M. Modelling cropping systems—Highlights of the symposium and preface to the special issues. **European Journal of Agronomy**, 2003. 18, 187–197.

VINCA, A., PARKINSON, S., BYERS, E., BUREK, P., KHAN, Z., KREY, V., DIUANA, F. A., WANG, Y., ILYAS, A., KÖBERLE, A. C., STAFFELL, I., PFENNINGER, S., MUHAMMAD, A., ROWE, A., SCHAEFFER, R., RAO, N. D., WADA, Y., DJILALI, N., RIAHI, K. The NExus Solutions Tool (NEST) v1.0: An open platform for optimizing multi-scale energy-water-land system transformations. **Geoscientific Model Development**, 13(3), 1095–1121. 2020.

VOGEL E, DONAT MG, ALEXANDER VL, MEINSHAUSEN M, RAY DK, KAROLY D, *et al*. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*. 2019.

ZHAO, Y.U., JUSTINA, D. D. D., WATANABE, J., ROCHA, J. V., GRAZIANO, P., LAMPARELLI, R. A. C. Multivariety sugarcane sucrose estimation using a combination of spectral and agrotechnology methods. **Proceedings of the SPIE**, Volume 10783, id. 107830L 14 pp.2018.