

## Agrometeorologia digital:

# as bases biofísicas para a revolução digital no campo

Felipe Gustavo Pilau<sup>1</sup>

Fabio Ricardo Marin<sup>2</sup>

**Resumo:** Uma população mundial estimada em 10 bilhões em 2100 e a incerteza sobre o clima futuro acentuam os debates sobre fome, abastecimento de água e energia. Especialmente no tocante à segurança alimentar, o Brasil é colocado em destaque. Por isso, pesquisas direcionadas ao pleno entendimento das relações solo-planta-atmosfera tornam-se cada vez mais fundamentais. Neste trabalho, expomos uma revisão bibliográfica a respeito das bases biofísicas fundamentais à concepção da Agrometeorologia Digital. Sistemas de suporte à tomada de decisão, baseados em modelos, podem introduzir o fator clima no gerenciamento da produção agropecuária, agregando uma gama de serviços agrometeorológicos que auxiliam nas decisões de gerenciamento, tornando-as mais eficazes a curto e longo prazo.

**Palavras-chave:** Biofísica. Ecofisiologia. Agrometeorologia Operacional. Modelagem. Tecnologia da Informação.

---

<sup>1</sup> Doutor em Agronomia (Física do Ambiente Agrícola) pela USP.  
cv Lattes: [lattes.cnpq.br/3838022789079158](https://lattes.cnpq.br/3838022789079158). E-mail: [fgpilau@usp.br](mailto:fgpilau@usp.br).

<sup>2</sup> Doutor em Agronomia (Física do Ambiente Agrícola) pela USP.  
cv Lattes: [lattes.cnpq.br/2318727424326430](https://lattes.cnpq.br/2318727424326430). E-mail: [fabio.marin@usp.br](mailto:fabio.marin@usp.br).

**Digital agrometeorology:** the biophysical basis for the digital revolution in the field

**Abstract:** An estimated world population of over 10 billion by 2100 and the uncertainties concerning the future climate heat up the debate on world food security, water supply and energy availability. Brazil is a key player in supplying a large part of world food demand. Hence, research directed towards the full understanding of soil-plant-atmosphere relations becomes increasingly important. This paper reviews literature on the fundamentals of biophysical bases for conceptualizing Digital Agrometeorology. Model-based decision support systems might help with the quantification of climate influence and with the management of agricultural production. It may bring a range of agrometeorological services that assist in management decisions, and increase the efficiency of short- and long-term processes of decision-making.

**Keywords:** Biophysics. Ecophysiology. Crop Modeling. Information Technology. Operational Agrometeorology.

## Introdução

Desde 1950, a população mundial passou de 2 bilhões e 536 milhões para 7 bilhões e 713 milhões de pessoas (UNITED NATIONS, 2019). Paralelamente a esse aumento populacional, na década de 1950, teve início a Revolução Verde, um conjunto de iniciativas tecnológicas que transformou a agropecuária. A partir daí, a produção mundial de alimentos também aumentava anualmente, estabelecendo um cenário positivo, no qual a segurança alimentar parecia não preocupar.

Atualmente, porém, com as projeções indicando 9 bilhões e 735 milhões de habitantes para o ano de 2050 e 10 bilhões e 875 milhões em 2100 (ONU, 2019), o cenário está se transformado. Fome, abastecimento de água e energia e o clima futuro passaram a serem temas cotidianamente discutidos.

Para alimentar esses adicionais futuros será preciso aumentar a produção agrícola mundial em até 60% (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012; BRUINSMA, 2003; LOBELL *et al.*, 2009). Essa necessidade implica, contudo, um desafio adicional, uma vez que o aumento da produção não poderá ser unicamente baseado no aumento da área cultivada. A maior parte do aumento da produção agrícola do mundo precisará vir do aumento da produtividade da área agrícola consolidada (VAN REES *et al.*, 2014). Tudo feito com alta eficiência de uso de insumos, especialmente água, com impacto mínimo sobre o clima global.

Esse cenário complexo e difícil, contudo, coloca o Brasil em destaque, com potencial para atender a boa parte da demanda projetada. Internamente, a estrutura e a relevância do setor agropecuário na economia nacional destacam a oportunidade que se apresenta ao País nas próximas décadas, sugerindo uma reflexão sobre que modelo agrícola poderia atender a esse novo patamar de demanda global por alimentos (MARIN *et al.*, 2016).

Nesse contexto, as pesquisas direcionadas ao pleno entendimento das relações solo-planta-atmosfera são fundamentais. A análise da variabilidade dos elementos meteorológicos possibilita definir os locais e

épocas propícias para a produção de alimentos. O conhecimento ampara na escolha do material genético mais apropriado ou na necessidade de melhoramento vegetal. Também auxilia quantificar a necessidade de água das plantas e a racionalizar o uso e manejo dos sistemas irrigados. Ainda permite a identificação do potencial produtivo das lavouras amparando produtor ou órgão regulador de estoque em sua tomada de decisão. Os apontamentos são exemplos dentre as mais variadas contribuições da agrometeorologia, com foco na tríade básica: Produtividade, Desempenho e Sustentabilidade.

Dentre os fatores de produção controlando a produtividade agrícola, aqueles relacionados à interação planta-atmosfera são, sem dúvida, os que têm ainda maior oportunidade de avanço. A queda no custo de processamento computacional das últimas duas décadas tem sido um dos impulsionadores principais deste campo científico. Diferentemente das demais áreas do conhecimento que envolvem a agricultura, a elevada variabilidade espaço-temporal da atmosfera não permite a formulação de modelos mentais mais simples, demandando recurso em tecnologia da informação para seu processamento. Neste contexto, a “revolução digital” vem permitindo um grande avanço no campo da agrometeorologia e, neste artigo, compilamos um conjunto de resultados científicos de quase duas décadas de estudo, que fazem ou poderão fazer parte de plataformas digitais destinadas a auxiliar a produção agrícola brasileira.

## **Bases biofísicas**

Neste e no próximo tópico do artigo, expomos uma revisão bibliográfica, sintetizada, de nossa pesquisa em Agrometeorologia, destacando estudos em micro e macro escala sobre sistemas de produção agrícola. Trata-se de ciência básica, fundamento para a construção da Agrometeorologia Digital.

### *Gerando conhecimento básico*

A quantificação da energia eletromagnética trocada entre plantas e seu meio ambiente é muito importante para estudos de fisiologia e ecofisiologia das plantas, e tem aplicações agrônômicas úteis. Para cultivos esparsos arbóreos desenvolvemos sistemas móveis de medida (MARIN, 2003; PILAU, 2005). Com saldo-radiômetros os equipamentos descrevem “esferas sensoras” (PILAU, 2005) ou “cilindros nocionais” (MARIN, 2003;

PILAU, 2005) de medida do balanço de radiação da(s) planta(s). Esses equipamentos nos possibilitaram entender melhor as alterações nos padrões das trocas energéticas pela copa em consequência do sistema de plantio e da variação da área foliar das plantas (ANGELOCCI *et al.*, 2008; PILAU; ANGELOCCI, 2015; PILAU; ANGELOCCI, 2016), e a mensurar a interferência das estruturas lenhosas (PILAU; ANGELOCCI, 2016). A partir dos dados coletados também desenvolvemos modelos para estimativa do balanço de radiação (PILAU *et al.*, 2007; ANGELOCCI *et al.*, 2008; PILAU; ANGELOCCI, 2014). As equações concebidas podem ser integradas àquelas de estimativa da evapotranspiração, auxiliando na estimativa do consumo hídrico por planta e consequentemente no manejo da irrigação dos cultivos (MARIN, 2003).

Em vista à carência de conhecimento sobre o consumo hídrico dos cultivos arbóreos esparsos, Marin (2000; 2003) também realizou medições da evapotranspiração e transpiração em citros e cafeeiros. O consumo hídrico dos cultivos agrícolas, a partir daí, passou a integrar continuamente as pesquisas. Metodologias e instrumental foram e seguem sendo muito trabalhadas (MARIN *et al.*, 2001; 2008). O uso e análise de métodos micrometeorológicas como o balanço de energia – Razão de Bowen (RIGHI *et al.*, 2007), o método aerodinâmico (MARIN; ANGELOCCI, 2011) e a correlação de vórtices turbulentos (Eddy Covariance) (OLIVEIRA, 2018) permitiram avaliar e entender sobre o consumo de água de diversas espécies (NASSIF *et al.*, 2018; MARIN *et al.*, 2005; SOBENKO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2017; 2019). Lisímetros, técnicas de medida do fluxo de seiva e porômetros foram e são usados para particionar evaporação-transpiração e compreender sobre as respostas estomáticas ao ambiente solo-atmosfera (ANGELOCCI *et al.*, 2004; MARIN *et al.* 2019).

Mais recentemente, uma reanálise dos dados de evapotranspiração nos conduziu a uma nova abordagem em relação ao consumo hídrico das espécies e sua relação com a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Marin *et al.* (2016; 2019) descreve que o enfoque normalmente usado para quantificar o consumo de água por culturas irrigadas, baseado na evapotranspiração de referência associado ao coeficiente de cultura (ET<sub>o</sub> K<sub>c</sub>) deve ser melhor avaliado. As análises mostram que o K<sub>c</sub> diminui à medida que o ET<sub>o</sub> aumenta (correlação negativa), como consequência do alto acoplamento planta-atmosfera, o que limita a quantidade de água que a planta poderia fornecer à atmosfera.

Ainda sobre a questão “água-produção agrícola”, análises em macroescala também foram feitas. As pesquisas analisaram os efeitos das

mudanças climáticas (MARIN, 2014) e de fenômenos de grande escala, como o *El Niño* Oscilação Sul, sobre as produções e risco climático.

A variabilidade espaço-temporal dos elementos meteorológicos nas áreas de produção agrícola também passou a integrar nossos trabalhos. Consideramos que analisar o fator meteorológico é fundamental para o pleno entendimento da variabilidade de produção em áreas de agricultura de precisão. A grande lacuna científica até aqui está na avaliação da variabilidade espacial e temporal dos elementos meteorológicos dentro da unidade produtiva. Trata-se de um exploratório contínuo, capaz de gerar uma quantidade grande de dados, que exigem trabalho intenso de análise. A Agrometeorologia de Precisão, assim por nós definida, busca exatamente isso.

Às análises dos fluxos de energia e água foram integradas as pesquisas direcionadas à compreensão de crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas. Analisar ganho/perda de biomassa, particionamento de fotoassimilados e fenologia das plantas nos induziram ao uso e desenvolvimento de modelos de simulação de crescimento de plantas. Com modelos mais simples foram feitos os primeiros trabalhos (ASSAD *et al.* 2007) e a concepção de um sistema de simulação (VIANNA *et al.*, 2017). Logo agregaram-se as plataformas e modelos de crescimento mais robustos (JONES *et al.*, 2003; KEATING *et al.*, 2003), baseados em processo biofísicos.

Com essas ferramentas podemos analisar o desempenho de materiais genéticos, ponderar sobre o consumo hídrico das plantas, analisar diferenças entre sistemas de produção, cunhar cenários futuros de alterações climáticas e seus impactos em zoneamentos agrícolas e no potencial de produção etc. (MARIN *et al.*, 2013; 2014).

Esse relato mostra nosso objetivo de prover conhecimento básico, mas com potencial de aplicação, para a análise e compreensão das relações entre as plantas e o ambiente de produção, com maior detalhamento à questão meteorológica. O conhecimento sobre as respostas vegetais ao ambiente de produção, ou a análise do próprio ambiente, são fundamentais para adequação dos genótipos, dos insumos e dos manejos, sempre com o intuito de maximizar a exploração dos recursos naturais, mas com plena consciência sobre a preservação ambiental. O conhecimento básico é o que permite o cientista a aventurar-se na concepção de sistemas de simulação. Iniciar suas tentativas de modelar o sistema real a partir de funções matemáticas. Esse, na maioria dos casos, é o ponto de partida para a concepção de um Sistema Agrometeorológico Digital.

## A concepção da Agrometeorologia Digital

Trocas energéticas e gasosas, respostas estomáticas, crescimento e desenvolvimento são as bases da modelagem de crescimento de plantas que formarão um Sistema de Suporte à Tomada de Decisão. Equações simulando as interações solo-planta-atmosfera e, por vezes, alguma(s) atividade de manejo(s), podem ser úteis como um meio para ajudar o cientista a definir suas prioridades de pesquisa. De acordo com Dourado-Neto *et al.* (1998), ao usar um modelo para estimar a importância e o efeito de determinados parâmetros, um pesquisador pode observar quais fatores devem ser mais estudados em pesquisas futuras, aumentando assim a compreensão do sistema. O modelo também tem o potencial de ajudar a entender as interações básicas no sistema solo-planta-atmosfera. Com base nessa premissa, modelos de crescimento e desenvolvimento de plantas devem ser elaborados para fornecer uma base para o planejamento e gerenciamento da produção agrícola.

### *Sistema de suporte à tomada de decisão*

Os sistemas de suporte à tomada de decisão são compostos por vários programas de computador tendo como um componente central os modelos de culturas descrevendo relações entre a cultura, a atmosfera, o solo e os componentes bióticos e abióticos do sistema.

Utilizando modelos de cultura, por exemplo, pode-se analisar e manipular um dado sistema produtivo com muito mais facilidade e rapidez do que seria possível considerando toda a complexidade do sistema real. Ao longo do século 20, houve um desenvolvimento científico sem precedentes em decorrência de uma mistura dos métodos de indução e dedução. A indução parte das observações específicas para leis gerais, enquanto a dedução parte de princípios gerais para realizar previsões específicas. Desde a década de 1960, modelos baseados em processos têm sido desenvolvidos e refinados passo a passo, guiados por resultados experimentais que preenchiam pouco a pouco pequenas lacunas no conhecimento em oposição aos grandes e onerosos experimentos (OVERMAN; SCHOLTZ III, 2003).

Uma das formas cientificamente aceitas para a análise de impactos das mudanças climáticas na agricultura é o uso de modelos de crescimento de plantas (MCP) baseados em processos biofísicos que ocorrem em culturas (do inglês, *process based crop model*) (ROSENZWEIG *et al.*, 2013). São ferramentas consagradas na literatura científica para testes de hipóteses

acadêmicas, bem como de avaliação de cenários e de impacto de mudanças climáticas na agricultura em escalas mundial (ROSENZWEIG; PARRY, 1994), nacional (ADAMS *et al.*, 1990) e regional (MARIN *et al.*, 2013). No entanto, apesar da importância desses modelos, uma das incertezas nas projeções agrícolas decorre, também, dos próprios modelos.

A comunidade de modeladores do clima tem atacado o problema da incerteza<sup>3</sup> utilizando agrupamentos (do inglês, *ensembles*) de modelos de circulação geral da atmosfera (SEMENOV; STRATONOVITCH, 2010). Os MCPs, contudo, são ainda utilizados com uma abordagem determinística, sem contar com uma análise probabilística adequada a despeito das incertezas associadas em seus algoritmos, dados de entrada e parâmetros (RÖTTER *et al.*, 2011). A opção para enfrentar essa limitação é o uso de um conjunto de MCPs em paralelo, adequadamente calibrados, em analogia aos *ensembles* dos modelos climáticos.

Por exemplo, em trigo (RÖTTER *et al.*, 2012) e cevada (PALOSUO *et al.*, 2011) foram utilizados nove diferentes MCPs para as simulações de efeitos da mudança no clima nessas culturas na Europa. Uma conclusão interessante dos trabalhos foi que nenhum dos modelos mostrou-se superior para todos os locais testados e que a média das previsões de todos os modelos mostrou-se a mais adequada para as simulações de produtividade. Asseng *et al.* (2013) encontraram resultados similares utilizando 27 modelos de trigo, mas verificaram que apenas três modelos escolhidos aleatoriamente seriam suficientes para reduzir a incerteza a um nível suficientemente baixo.

Merece destaque o fato de o trabalho de Asseng *et al.* (2013) ter sido publicado em periódico de altíssimo impacto (*Nature Climate Change*) por se revelar uma verdadeira ruptura nas limitações previamente atribuídas ao uso dos MCPs em larga escala. Até poucos anos atrás, por tratarem de processos biofísicos relativamente detalhados do sistema de produção agrícola, tais modelos eram considerados como dedicados à simulação de pequenas parcelas, sem possibilidade de extrapolação para grandes áreas. O trabalho de Asseng *et al.* (2013), por verificar que o uso de múltiplos modelos em paralelo foi capaz de reduzir a incerteza para níveis similares aos obtidos nos sítios experimentais, demonstrou a capacidade dessa ferramenta para aplicações operacionais em larga escala.

O estado da arte no estudo dos MCPs, contudo, aponta que a próxima fronteira nessa linha de pesquisa é a incorporação da simulação

---

3 Qualquer desvio em relação a um valor ideal obtido a partir de um conhecimento determinístico supostamente completo sobre um sistema.

estocástica nesse contexto, permitindo assim conhecer como a incerteza dos dados de entrada se propaga nas variáveis de saída do modelo. Além disso, uma necessidade importante no âmbito da abordagem estocástica é considerar a correlação entre as variáveis consideradas aleatórias durante o processo de simulação, permitindo assim projetar as incertezas dos parâmetros e/ou dados de entrada no resultado final das simulações de modo biofisiologicamente coerente e evitando incluir incertezas não pertencentes à condição de contorno do sistema simulado (BAIGORRIA *et al.* 2010). Nesse sentido, o argumento de Sinclair e Seligman (1996) sobre a importância do desenvolvimento dos próprios modelos para grupos de cientistas, permitindo aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos envolvidos no processo de simulação e sobre as incertezas inerentes ao uso de modelos, essa abordagem estocástica seria uma oportunidade para o Brasil.

#### *Os modelos: conceitos e definições*

Um modelo é um padrão, um plano, uma representação ou descrição feita para demonstrar o funcionamento de um objeto, um sistema ou conceito. Do latim, a palavra modelo tem origem em *modulus*, que significa ‘uma pequena proporção ou redução de um padrão’. Modelos de simulação são representações relativamente simples do mundo real a nossa volta.

Modelos podem ser classificados de várias formas e, didaticamente, são normalmente divididos em modelos empíricos e mecanísticos (THORNLEY; JOHNSON, 2000). Modelos empíricos são fundamentalmente relações matemáticas descritas a partir da observação do sistema, por informações biológicas ou por qualquer conhecimento da estrutura do sistema estudado. Consistem em uma ou mais equações, e normalmente estão associados a características locais, com dificuldade para sua extrapolação.

Os modelos mecanísticos são relativamente mais complexos que os modelos empíricos. Entretanto, seu conteúdo normalmente aplica-se a uma maior gama de fenômenos. Baseiam-se na física e nos processos

<b>Características</b>	<b>Pesquisa</b>	<b>Aplicação Prática</b>
Hipóteses	Especulativa	Bem aceito
Conexões com dados observados	Tênue (geralmente)	Bom
Precisão das previsões	Variável	Bom
Escopo/Alcance	Amplio	Limitado
Complexidade	Complexo	Simple
Modelo	Mecanístico	Empírico

**Tabela 1.** Modelos de pesquisa e modelos aplicados: comparação das principais diferenças. Adaptado de THORNLEY; JOHNSON (2000, p. 14).

fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura e, por esse motivo, oferecem mais respostas mais consistentes.

Quando aplicada a sistemas biológicos, a simulação mecanística é altamente recomendada, uma vez que sistemas vivos são compostos por subsistemas e componentes, e cada um deles interage simultaneamente com os demais de modo não-linear e caótico, por natureza. Por causa dessa complexidade, métodos clássicos (matemáticos-estatísticos) aplicados a sistemas vivos têm se mostrado inadequados para sistemas vivos (JONES; LYUTEN, 1998). Essa interação não linear deve-se, em última instância, à organização hierárquica dos sistemas que dá origem aos subsistemas.

Os modelos mecanísticos têm uma rota relativamente mais longa, já que em seus componentes precisam respeitar a ordem dos processos e suas respectivas propriedades, introduzindo variáveis extras no nível de órgãos, tecidos e agregados bioquímicos em que dados de observações adicionais geralmente também são disponíveis. Pela síntese e integração do conjunto de equações que definem o sistema, chega-se então às variáveis de interesse da cultura, como massa de colmos e teor de sacarose, por exemplo.

Boote *et al.* (1996) classificaram três níveis de uso dos modelos de simulação de culturas: modelos utilizados em pesquisas, modelos para uso em análises tecnológicas sobre o manejo dos cultivos e modelos para suporte à política de planejamento agrícola. Cada um deles envolve uma escala espaço-temporal, um nível de detalhamento dos processos modelados e um nível de compromisso com a aplicação operacional.

Thornley e Johnson (2000), por sua vez, classificam os modelos em dois grupos principais: os de aplicação em pesquisas e os de aplicação prática (Tabela 1). Os modelos aplicados em pesquisa, por serem mais

detalhados, baseados em processos e possuírem um maior número de parâmetros, tendem a apresentar respostas mais próximas da realidade. Já os modelos de aplicação prática, por serem mais simples e baseados em equações empíricas, resultam em aproximações mais superficiais, tendo aplicações específicas para os pontos nos quais foram calibrados e maior dificuldade para extrapolação e condições de contorno mais limitadas. Atualmente, dada a boa disponibilidade de dados de entrada e mesmo o domínio relativamente avançado nas técnicas de simulação, tem-se cada vez mais utilizado os modelos de simulação inicialmente classificados como “pesquisa” em aplicações práticas, elevando a qualidade das predições e da tomada de decisão.

Outra classificação possível envolve o modo pelo qual as variáveis de estado de um modelo são simuladas. Nesse contexto, pode-se dividir modelos em determinísticos e estocásticos. Os modelos determinísticos têm suas variáveis de estado determinadas unicamente por seus parâmetros e pelos valores prévios das variáveis de estado. Nos modelos estocásticos, um componente aleatório está presente e as variáveis de estado não são descritas por um único valor. Ao contrário, elas são descritas por distribuições de probabilidade.

Em modelagem de sistemas biológicos, há uma terminologia convencionalizada pela comunidade científica que facilita a comunicação. Os principais termos utilizados são os seguintes:

- **Sistema:** coleção de componentes e suas inter-relações, agrupadas com o propósito de estudar alguma parte do mundo real. Dependente da visão do modelador sobre a realidade e do propósito da modelagem.
- **Ambiente e condições de contorno:** na definição do escopo de um sistema, é necessário definir seus limites e seu conteúdo. O ambiente inclui tudo, com exceção dos componentes do sistema. Ambiente afeta o sistema, mas o sistema não afeta o ambiente.
- **Modelo:** Representação matemática de um sistema. Conjunto de equações na forma de códigos de programação que quantifica o conhecimento sobre o sistema. Em agricultura, por exemplo, **sistema** pode ser uma cultura; seus **elementos** podem ser as folhas, raízes, colmos, flores e frutos, e seus **processos**, a transpiração, fotossíntese, respiração, crescimento radicular, particionamento.

- **Entradas e saídas:** variáveis de entrada (variáveis exógenas) são grandezas do ambiente que afetam o comportamento do sistema, mas não são influenciados por ele. Variáveis de saída representam numericamente o comportamento do sistema que é de interesse para o modelador. Na modelagem agrometeorológica, há especial interesse em analisar variáveis meteorológicas e sua repercussão nos modelos.
- **Parâmetros e Constantes:** são características dos componentes do sistema que permanecem inalteradas ao longo de uma simulação. **Constantes** são grandezas com valores suficientemente confiáveis que permanecem fixos ainda que as condições experimentais sejam modificadas. **Parâmetros** são grandezas com maior incerteza e que podem ser alterados para configurar o modelo a uma situação específica de simulação.
- **Variáveis de Estado:** são grandezas que descrevem os componentes do sistema, mudando com o tempo conforme os componentes interagem entre si e com o ambiente.
- **Calibração:** consiste em ajustar parâmetros para aproximar as simulações dos dados observados experimentalmente. A estrutura do modelo, portanto, permanece a mesma. Em alguns casos, a calibração é o único meio prático de estimar o valor de alguns parâmetros considerados em processos biológicos.
- **Validação:** é o processo de comparação das variáveis de saída com dados experimentais que não foram utilizados na calibração.
- **Análise de Sensibilidade:** consiste na exploração do desempenho de um modelo pela variação nos valores dos parâmetros. A finalidade dessa análise é quantificar quanto a variação em um parâmetro influencia nas variáveis de saída de um modelo. Pode-se agrupá-las grosseiramente em dois modos de análise: local e global.

Esses termos normalmente precisam ser representados esquematicamente com vistas a esclarecer sobre o sistema a ser tratado, mantendo igualmente um padrão de comunicação visual entre os interessados no modelo.

### *Linguagens de programação*

Quando se necessita programar um modelo em um computador, é válido lembrar que a melhor linguagem para o fazer é aquela que se conhece bem. Para aqueles que ainda não dominam nenhuma linguagem de programação, vale lembrar que uma das principais e mais antigas linguagens de programação em modelagem de sistemas biológicos é o Fortran. Ela foi desenvolvida a partir da década de 1950, continua a ser usada atualmente, e seu nome é um acrônimo da expressão “IBM Mathematical FORMula TRANslation System”.

A linguagem Fortran é principalmente usada em análise numérica. Apesar de ter sido inicialmente uma linguagem de programação procedural, versões recentes de Fortran possuem características que permitem suportar programação orientada por objetos. O Fortran permite a criação de programas que primam pela velocidade de execução. Daí reside seu uso em aplicações científicas computacionalmente intensivas como meteorologia, oceanografia, física, astronomia, geofísica, economia e modelagem agrícola.

### **A Agrometeorologia Digital**

Com base no exposto, podemos afirmar que a agrometeorologia, uma ciência holística interdisciplinar, trata de um sistema complexo envolvendo solo, planta, atmosfera, manejo agrícola e outros, que interagem dinamicamente em várias escalas espaciais e temporais. O sistema solo-planta-atmosfera precisa ser muito bem compreendido a fim de se desenvolver aplicações ou recomendações operacionais razoáveis. As informações meteorológicas observadas, em tempo real e de forma remota combinadas em modelos mais ou menos complexos, focados nos componentes das partes do sistema, podem detectar sensibilidades ou respostas potenciais. O sistema, assim, poderá inferir sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura, o risco de geada, a ocorrência de estiagem, a condição para realização de práticas agrícolas: preparo do solo, semeadura, adubação, aplicação de defensivos, irrigação, colheita, trafegabilidade etc. Um sistema agrometeorológico pode também estar associado à previsão do tempo. Isso permite ao usuário fazer um planejamento antecipado das atividades. Cenários futuros ainda mais prolongados também podem ser indicados pelo sistema. O uso de séries passadas de dados meteorológicos pode auxiliar nas previsões futuras. Como base em “n” anos anteriores, os modelos podem criar as chamadas “plumas” de simulação. São nume-

rosos resultados simulados capazes de assinalar para a probabilidade do acontecimento, a exemplo de um sistema de previsão de safras. Portanto, a Agrometeorologia Digital, ao trazer o fator faltante da Revolução Verde: o clima, e disponibilizar uma gama de serviços agrometeorológicos, auxilia nas decisões de gerenciamento eficazes a curto e longo prazo.

## Referências

- ADAMS, Richard M. *et al.* Global climate change and US agriculture. *Nature*, v. 345, p. 219–24, 1990. Disponível em: [nature.com/nature/journal/v345/n6272/abs/345219a0.html](http://nature.com/nature/journal/v345/n6272/abs/345219a0.html). Acesso em: 02 out. 2019.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. *World Agriculture Towards 2030/2050: the 2012 revision*. Rome: FAO, 2012. (ESA working paper n° 12-03).
- ANGELOCCI, L. R. *et al.* Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 16, p. 53-64, 2004.
- ANGELOCCI, L. R. *et al.* Radiation balance of coffee hedgerows. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 274-281, 2008.
- ASSAD, E. D. *et al.* Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 5, p. 615-625, 2007.
- ASSENG, S. *et al.* Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 827-832, 2013. Disponível em: [doi.org/10.1038/nclimate1916](https://doi.org/10.1038/nclimate1916). Acesso em: 02 out. 2019.
- BAIGORRIA, G. A.; JONES, J. W. GIST: A stochastic model for generating spatially and temporally correlated daily rainfall data. *Journal of Climate*, v. 23, 5990-6008, 2010. Disponível em: [doi.org/10.1175/2010JCLI3537.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3537.1). Acesso em: 02 out. 2019.
- BOOTE, K. J. *et al.* Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, v. 88, n. 5, p. 704–16, 1996. Disponível em: [doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x](https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x). Acesso: 02 out. 2019
- BRUINSMA, J. *World Agriculture: towards 2015/2030*. Rome: FAO; London: Earthscan, 2003. Disponível em: [fao.org/3/a-y4252e.pdf](http://fao.org/3/a-y4252e.pdf). Acesso em: 13 jan. 2016.
- CARVALHO, K. S. *et al.* Assessing sugarcane evapotranspiration based on a biophysical approach. *International Journal of Current Research*, v. 9, n. 4, p. 48601-48610, 2017.

CARVALHO, K. S. *et al.* Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. *Australian Journal of Crop Science*, v. 13, n. 8, p. 1835–2707, 2019.

DOURADO-NETO, D. *et al.* Principles of crop modelling and simulation: II. The implications of the objective in model development. *Scientia Agricola*, v. 55, p. 46-57, 1998.

JONES, J. W. *et al.* The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, v. 18, n. 3-4, p. 235-65, 2003.

KEATING, B. A. *et al.* An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, v. 18, n. 3-4, p. 267-88, 2003.

LOBELL, D. B. *et al.* Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 34, p. 179-204, 2009. Disponível em: [doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740](https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740). Acesso em: 02 out. 2019.

MARIN, F. R. *Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida 'Tahiti'*. 2000. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

\_\_\_\_\_. *Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado*. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

\_\_\_\_\_. *Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos*. 2014. 262 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in southern Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 98, n. 6, p. 1091-1096, 2011.

MARIN, F. R. *et al.* Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*, v. 58, n. 4, p. 839-844, 2001. Disponível em: [dx.doi.org/10.1590/S0103-90162001000400028](https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162001000400028). Acesso em: 02 out. 2019.

MARIN, F. R. *et al.* Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in Southern Brazil. *Experimental Agriculture*, v. 41, n. 2, p. 1-11, 2005.

MARIN, F. R. *et al.* Fluxo de seiva pelo método do balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. *Bragantia*, v. 67, n. 1, p. 1-14, 2008.

MARIN, F. R. *et al.* Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, v. 117, n. 1-2, p. 227-39, 2013.

MARIN, F. R. *et al.* How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 26, n. 1, p. 49-63, 2014. Disponível em: [doi.org/10.1007/s40626-014-0006-2](https://doi.org/10.1007/s40626-014-0006-2). Acesso em: 02 out. 2019.

MARIN, F. R. *et al.* Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. *Agricultural Water Management*, v. 163, p. 139-145, 2016. Disponível em: [doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.010). Acesso em: 02 out. 2019.

MARIN, F. R. *et al.* Revisiting the crop coefficient–reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019. Disponível em: [doi.org/10.1007/s00704-019-02940-z](https://doi.org/10.1007/s00704-019-02940-z). Acesso em: 02 out. 2019.

NASSIF, D. S. P. *et al.* The role of decoupling factor on sugarcane crop water use under tropical conditions. *Experimental Agriculture*, 2019, p. 1–11. Disponível em: [doi.org/10.1017/S0014479718000480](https://doi.org/10.1017/S0014479718000480). Acesso em: 02 out. 2019.

OLIVEIRA, R. K. Fluxos de CO<sub>2</sub>, água e energia em área de renovação de canavial com cultivo de soja. 2018. 61 p. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

OVERMAN, A. R.; SCHOLTZ, R. V. III. Mathematical models of crop growth and yield. *Annals of Botany*, v. 91, n. 3, p. 403-404, 2003. Disponível em: [doi.org/10.1093/aob/mcgo27](https://doi.org/10.1093/aob/mcgo27). Acesso em: 02 out. 2019.

PALOSUO, T. *et al.* 2013. How to assess climate change impacts on farmers' crop yields? In: IMPACTS WORLD 2013 – International Conference on Climate Change Effects, 2013, Postdam. *Anais...* Postdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2013, p. 327-334. Disponível em: [gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:152514:5/component/escidoc:152588/Impacts\\_World\\_2013.pdf](https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:152514:5/component/escidoc:152588/Impacts_World_2013.pdf). Acesso em: 15 nov. 2019.

PILAU, F. G. Saldo de radiação da copa de laranjeira num pomar e de renques de cafeeiros: medidas e estimativas, 2005. *Tese* (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Radiation balance of an orange tree in orchard and its relation with global solar radiation and grass net radiation. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 15, p. 257-266, 2007.

\_\_\_\_\_. Balanço de radiação de copas de cafeeiros em renques e suas relações com radiação solar global e saldo de radiação de gramado. *Bragantia*, Campinas, v. 73, p. 335-342, 2014.

\_\_\_\_\_. Leaf area and solar radiation interception by orange tree top. *Bragantia*, Campinas, v. 74, n. 4, p. 476-482, 2015.

\_\_\_\_\_. Padrões de interceptação de radiação solar por cafeeiros em função da área foliar. *Coffee Science*, v. 11, n. 1, p. 127-136, 2016.

RIGHI, E. Z. *et al.* Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 15, p. 267-279, 2007.

ROSENZWEIG, C.; PARRY, M. L. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367 (6459): p. 133-138, 1994. Disponível em: [ecoethics.net/cyprus-institute.us/PDF/Rosensweig-Food-Supply.pdf](http://ecoethics.net/cyprus-institute.us/PDF/Rosensweig-Food-Supply.pdf). Acesso em: 02 out. 2019.

ROSENZWEIG, C. *et al.* Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, January, 201222463, 2013. Disponível em: [doi.org/10.1073/pnas.1222463110](https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110). Acesso em: 02 out. 2019.

RÖTTER, R. P. *et al.* Crop-climate models need an overhaul. *Nature Climate Change*, v. 1, p. 175-77, 2011.

RÖTTER, R. P. *et al.* Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. *Field Crops Research*, v. 133, p. 23-36, 2012. Disponível em: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429012001098](http://sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429012001098). Acesso em: 02 out. 2019

SEMENOV, M.; STRATONOVITCH, P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, v. 41, n. 1, p. 1-14, 2010.

SILVA, Evandro H. F. M. da *et al.* Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in southern Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 218, p. 1-7, 2019. Disponível em: [doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.003). Acesso em: 02 out. 2019.

Sinclair, T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy Journal*, v. 88, n. 5, p. 698-704, 1996.

SOBENKO, L. R. *et al.* Irrigation requirements are lower than those usually prescribed for a maize crop in southern Brazil. *Experimental Agriculture*, v. 55, n. 4, 662-671. Disponível em: [doi.org/10.1017/S0014479718000339](https://doi.org/10.1017/S0014479718000339). Acesso em: 02 out 2019.

Thornley J. H. M.; JOHNSON I. R. *Plant and crop modeling: a mathematical approach to plant and crop physiology*. Caldwell, NJ: Blackburn, 2000.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2019*, Online Edition, 2019. Disponível em: [population.un.org/wpp/Download/Standard/Population](https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population). Acesso: 01 set. de 2019.

VAN REES, H. *et al.* Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: prospects for further improvement. *Field Crops Research*, v. 164, p. 1-11, 2014.

VIANNA, M. S. *et al.* *Modelo Agrometeorológico Genérico de Produção Vegetal (MAGé)*. Piracicaba: ESALQ, 2017.