

SISTEMA MECANIZADO DA CANA-DE-AÇÚCAR INTEGRADA À PRODUÇÃO DE ENERGIA E ALIMENTOS

Fábio Cesar da Silva¹

Pedro Luiz de Freitas²

Alexandre de Castro³

Valter Barbieri⁴

Introdução

A cultura da cana-de-açúcar destaca-se no cenário agrícola nacional não somente pela extensão da área plantada, cerca de 10 milhões de hectares, mas também pelos múltiplos potenciais de diversificação para alimentação e geração de energia. A cana-de-açúcar está entre as culturas que mais experimentaram mudanças nos últimos vinte anos, atendendo às necessidades de maior eficiência em função de questões socioeconômicas e ambientais. Nesse período, incorporaram-se novas técnicas de manejo, entre elas a integração com culturas anuais como soja, amendoim, crotalária, sorgo sacarino e milho por ocasião da reforma do canavial, também, técnicas de preparo do solo (profundo, encanteirado profundo e sulcação direta) e de plantio (distribuição mecanizada de colmos-semente e mudas pré-brotadas), além da colheita mecanizada, operação que vem se ajustando aos princípios da agricultura de precisão. A eliminação da queima foi um marco para a sustentabilidade do sistema de produção, que está se ajustando para que a palha que sobra nos campos seja utilizada na produção de energia, tal como é feito com o bagaço originado do processamento da cana.

Tais mudanças no sistema de produção da cana-de-açúcar induzem a uma revolução tecnológica, função de alguns condicionantes fundamentais, tais como:

1 Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária – Campinas - SP e Professor na Fatec Piracicaba / Agência Inova Paula Souza. Email: fabio.silva@embrapa.br e fcesar.silva@hotmail.com.

2 Pesquisador da Embrapa Solos - Rio de Janeiro - RJ.

E-mail: pedro.freitas@embrapa.br; pedroluizdefreitas@gmail.com.

3 Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas SP.

E-mail: alexandre.castro@embrapa.br - alxcas@gmail.com.

4 Professor aposentado da ESALQ-USP, Piracicaba -SP. E-mail: valterbarbieri@yahoo.com.br.

- I) a proibição do processo de queima do palhiço da cana (Lei nº 11.241/2002 e Decreto no. 47.700/2013);
- II) a proibição de plantio com pessoas em cima dos caminhões (Portaria MTE nº 2.546 que alterou a redação da NR 31);
- III) o aumento dos custos de produção pela substituição do uso de mão de obra no plantio e no corte da cana pelos processos mecanizados.

Dr. Roberto Rodrigues ressalta, no prefácio da obra intitulada **“Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos”** (SILVA et al., 2015), que *“a cultura da cana-de-açúcar deve atender a demanda por energia e compatibilizar com a produção de alimentos, criando um cenário desafiador para futuro do setor sucroenergético”*.

O livro mencionado descreve os sistemas de manejo do solo e da água empregados na produção mecanizada da cultura e as alternativas existentes na busca da sustentabilidade da produção de biocombustível, açúcar, energia e outros derivados. A compatibilização com os conceitos de sustentabilidade se traduz pelo aumento da diversidade, conservação dos recursos naturais e o equilíbrio da produção de biomassa energética e a de alimentos, sem perda de produtividade.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), segundo seu diretor presidente, Dr. Mauricio Lopes, tem *“investido em pesquisas na agroindústria canavieira por meio de projetos articulados que tratem prioritariamente dos focos de pesquisa e desenvolvimento, transferência de tecnologias e desenvolvimento institucional”*. Entre os exemplos de investimento em pesquisa na área temos o projeto RotCana (*Desenvolvimento e modelagem de sistemas de produção de oleaginosas na reforma de canavial para produção sustentável de biodiesel na Região Centro-sul*) e o projeto Cana (*Desenvolvimento de sistemas de cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado*). Resultados de pesquisas como essas são abordados na obra. No entanto, a construção de um documento que busca o estado da arte do conhecimento do setor sucroenergético não poderia ser realizada sem a contribuição de mais de 80 renomados autores, entre eles os membros do Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária (SNPA), trazendo consigo as experiências e a parceria do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (Apta), da Universidade de São Paulo (USP), da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) entre outras e da Canaplan e da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB).

Abordam-se vários temas na obra, fornecendo orientações de planejamento estratégico, operacional e de implantação sustentável da cultura de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, sem queima. A estes fatores determinantes da crise do setor se somaram outros: anos de clima irregular, ou por excesso de chuva, ou por seca inclemente reduziram a produção ou inibiram a colheita.

Aspectos socioeconômicos e da conjuntura do mercado internacional do setor, elaborados pela CANAPLAN e pela equipe do Instituto de Economia da UNICAMP, Embrapa e da USP, explicam as políticas públicas que poderiam alavancar a cadeia produtiva. Mas, ressalta Rodrigues, *“só teremos uma solução definitiva quando for estabelecida qual a matriz energética ideal para o país e qual o papel da agroenergia nela. Aí sim, seriam tomadas medidas estruturantes que sinalizariam o futuro da atividade com segurança e sem intervencionismos de oportunidade”* (SILVA et al., 2015).

Na visão do Dr. Roberto Rodrigues (Coordenador Centro de Agronegócio da FGV e Ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento de 2003 a 2006), tem havido uma *“perda de produtividade dos canaviais em face de adaptação ao novo sistema produtivo e as condições climáticas desfavoráveis”*. Salieta ainda que novas variedades de cana, muito mais produtivas – as chamadas *“canas de três dígitos”* (apud SILVA et al., 2015, p.12) (melhoramento e biotecnologia juntos) já estão sendo testadas. Destaca que a adubação com fertilizantes especiais e o aprimoramento das recomendações de adubação e calagem estão em uso, assim como, as mudas pré-brotadas (MPBs), em franca evolução, e uma espécie de *“semente”* da cana. Afirma que, *“Tudo isso implica um conjunto de novidades que mudará o paradigma agroindustrial de forma notável, quase tanto ou até mais do que aconteceu quando se criou o sistema de pagamento por teor de sacarose”* (SILVA et al., 2015, p. 13).

Em termos de mecanização agrícola, discute-se na obra as novas plantadeiras, novos cultivadores, sistemas de colheita e de tratos culturais em desenvolvimento e/ou modificação; testes com transportes virão com certeza. Na indústria, surgem grandes mudanças pelos sistemas de produção de cana, com ênfase para *“cogeração de energia e a utilização de subprodutos para biorefinaria e outros fins, inclusive o etanol de segunda geração”*, como destacou Rodrigues.

Silva et al. destacam a seleção de cultivares de soja recomendados para plantio em rotação com cana especialmente para os Estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e São Paulo. A adoção de conceitos básicos do Sistema Plantio Direto (SPD), associado ao plantio de soja ou amendoim na reforma do canavial, refletiu em um aumento de produtividade de cana-de-açúcar de até 10% nos primeiros dois anos (Silva et al, 2016a). As vantagens observadas e validadas na adoção da soja e amendoim na reforma do canavial vão desde o aumento da produtividade da cana-planta, amplamente relatado na literatura, ao controle de plantas daninhas, com ganhos econômicos. Outro resultado relevante foi o desenvolvimento de metodologia que permite estimar a necessidade de reposição de nitrogênio, fósforo e potássio na cana-de-açúcar, baseado em modelagem de balanço de nutrientes.

Há um cenário de mudança de paradigmas no setor sucroenergético que implica em na mecanização associada a ferramentas de tecnologia de informação em todas as fases do sistema de produção. Isso terá papel fundamental na redução dos custos e na otimização da produtividade. Nova tecnologia virá à luz nos próximos anos, gerando maior produtividade agroindustrial, produtos com mais qualidade, custo menor e competitividade.

No presente artigo abordam-se os aspectos básicos da quantificação de fatores que formam a produtividade do canavial, por meio de fundamentação Matemática aplicada à fisiologia de culturas considerando as condições climáticas e as respostas a correção e fertilização. Também são abordados os fatores que reduzem a produtividade do canavial como seleção de espécies de culturas anuais (soja, amendoim, girassol, crotalaria, sorgo sacarino e milho) para a reforma do canavial assim como as práticas e processos de manejo de solo (plantio direto, convencional e preparo intensivo, arranjo e espaçamento entre linhas e entre plantas, plantio com toletes ou com mudas pré-brotadas).

Modelo de crescimento da cana-de-açúcar

1. Modelagem Matemática para agricultura: entendendo o conceito

Diversos pesquisadores da área de modelagem têm-se preocupado em definir o que é um modelo (THORNLEY, 1976; WIT, 1982; VRIES, 1987; WHISLER et al., 1986; BASSANEZI; FERREIRA, 1988; LEFFELAAR, 1993; PESSOA et al., 1997). Por exemplo, Wit (1982) considerou que modelo é a representação simplificada de um sistema, ele definiu simulação como a arte de construir modelos. Thornley (1976) definiu modelo matemático ou simplesmente modelo como uma equação ou conjunto de equações que devem representar um sistema real. Thornley (1976) acrescenta que o modelo deve, entretanto, assemelhar-se ao sistema e, se o sistema for dinâmico, deve ser capaz de simular seus movimentos.

Um bom modelo preditivo simula exatamente o comportamento de uma parte do mundo real em situações as quais seu comportamento tem ou não sido observado. Ele é, entretanto, um bom instrumento para aplicar o conhecimento científico na prática e deve prever razoavelmente bem, em condições limites diversas, para suprir seu usuário com soluções alternativas de um problema (VRIES, 1987). Thornley (1976) acrescenta que o uso de modelos bem elaborados traz inúmeras vantagens, pois os mesmos devem resumir convenientemente uma série de informações, que permitem progressos no conhecimento da planta e suas respostas ao ambiente, bem como, devem também esclarecer pontos em que o conhecimento seja limitado, e ainda, os modelos podem estimular o trabalho em equipe, facilitar o planejamento e indicar prioridades de pesquisa.

Whisler et al. (1986) classificaram em três categorias básicas as razões para a construção de modelos: a primeira, como auxílio na interpretação de resultados experimentais; a segunda, como ferramenta para pesquisa agrônômica, e terceiro, como ferramenta de desenvolvimento agrônômico. De um modo geral pode-se dizer que a tentativa de construir um modelo ajuda a detectar áreas nas quais o conhecimento e dados são escassos; a modelagem estimula novas ideias; comparados com métodos tradicionais, os modelos fazem, geralmente, melhor uso de dados que estão se tornando mais caros; modelos permitem interpolação e previsão; um modelo

resume convenientemente grande quantidade de informações; um bom modelo pode ser usado para sugerir prioridades de recursos na pesquisa; a base Matemática para as hipóteses permite progresso no sentido de conhecer melhor o comportamento do sistema e discernir entre hipóteses alternativas (PEREIRA, 1987).

Partindo-se do princípio de que uma área agrícola pode ser vista como um sistema, integrando processos ecológicos, econômicos e sociais, o uso de modelos matemáticos e simuladores que representem a integração entre as variáveis envolvidas nos processos de sustentabilidade são importantes ferramentas na pesquisa agrícola. Tais modelos permitem evoluir para um estágio de desenvolvimento tecnológico mais avançado, integrando, de forma organizada, o conhecimento gerado e prevendo o comportamento de um ou de vários fenômenos, pelo acompanhamento da dinâmica espaço-temporal do problema (PESSOA et al., 1997). Embora em outros países seja comum o uso de modelos matemáticos e simuladores na pesquisa agropecuária, no Brasil essa prática ainda é pouco utilizada.

Segundo Pessoa et al. (1997), o descrédito no uso de modelos está associado a uma visão reducionista, imposta à sua fase de elaboração, descrevendo modelos que não refletem a realidade encontrada no campo, fato decorrente da ausência de uma equipe multidisciplinar que descreva, em detalhes, os fenômenos intrínsecos aos objetivos do estudo. Deve-se, ainda, a falta de técnicas matemáticas mais apropriadas, pois às vezes, pequenos problemas analíticos impedem o andamento de soluções simples para problemas importantes. Outro motivo que impede o uso de modelos matemáticos e simuladores, no Brasil é a ausência de informações qualitativas e quantitativas disponíveis, geralmente em decorrência da falta de publicação de dados que facultem a elaboração, manutenção e atualização de um banco de dados detalhados relativos às questões mais variadas relacionadas ao ambiente agropecuário. Com frequência as informações são esquecidas ou até perdidas, tornando-se necessários novos experimentos para coletá-las, o que é uma prática que exige grande trabalho, disponibilidade de tempo, local, material, mão de obra e assim, recursos financeiros.

Uma investigação do sistema real, envolvendo medições de todas as variáveis que influenciam um processo em uma escala mais ampla é, na maioria das vezes, impossível de ser conduzida pela limitação de custos, de pessoal, de local, etc. Uma alternativa para contornar esse problema é partir da proposição de uma descrição do sistema real, que o represente na escala do objetivo do estudo, cuja apresentação deve basear-se em conhecimento técnico de alto nível, adquirido em pesquisas básicas, que facilitam a descrição dos processos envolvidos. Mediante essa abordagem, torna-se possível a proposição de modelos matemáticos que representem o problema de forma mais eficiente e, posteriormente, sua transcrição para linguagem computacional, viabilizando o acompanhamento da dinâmica desse sistema pela simulação de cenários alternativos, muitos deles ainda não testados em cenário real (PESSOA et al., 1997).

Na área de simulação, entende-se por sistema um conjunto de objetos, ou elementos, que descrevem as principais características de uma situação real

a estudar. Quanto melhor a interpretação dada aos fenômenos envolvidos no sistema, maior exatidão será alcançada na sua descrição. De um modo geral, um modelo é a representação de um sistema em determinada forma de linguagem, não necessariamente a linguagem Matemática. A decisão da forma de descrição mais fidedigna à representação pretendida do sistema está diretamente associada aos interesses envolvidos no estudo por modelagem (LEFFELAAR, 1993).

Dentre muitos outros pesquisadores de várias áreas, e em especial Pessoa et al. (1997), por serem da área afim, dividem os modelos em vários tipos, cujos mais conhecidos são:

- **Modelos conceituais:** apresentam de forma objetiva, clara e ordenada as considerações pertinentes a um problema em estudo. Por meio dele é possível uma visão holística do problema, relacionando as várias áreas do conhecimento envolvidas na sua descrição. Os requisitos básicos para sua elaboração são: conhecimento amplo do assunto; clareza e objetividade da finalidade de elaboração do modelo e, conseqüentemente, da definição das variáveis a serem representadas. Esse tipo de modelo aparenta simplicidade por transmitir ao usuário clareza na representação esquemática da seqüência de ideias, apresentação do problema e sua compreensão, mas sua construção, muitas vezes, não é tarefa fácil. Esse modelo conceitual apresenta os compartimentos representativos das áreas de conhecimento que mais influenciam na identificação do problema exposto, detalhando aspectos específicos da área. As interligações entre os compartimentos são assinaladas, apresentando, portanto, de forma clara, lógica e objetiva, a sensibilidade de cada compartimento a possíveis reações no ambiente com relação às intervenções humanas na área.

- **Modelos físicos:** são modelos de sistemas de produção, relativamente rígidos, que respeitam as condições dentro das quais foi formulada sua proposta prática. Neles, geralmente se mantém escalas proporcionais a do sistema real. A partir desses modelos, projetados teoricamente, mas possuidores de hipóteses claramente definidas permitem-se identificar possíveis problemas do sistema real. Como exemplos de aplicação de modelos físicos citam-se maquetes de estabelecimentos agropecuários e estudos de sistemas de produção de leiteiros.

- **Modelos matemáticos:** são descrições construídas em linguagem Matemática, mediante simplificações do sistema, sendo representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais.

Estes modelos matemáticos, ainda segundo Pessoa et al. (1997), podem ser classificados em:

- **Modelos determinísticos:** também conhecidos como não probabilísticos, cujo modelo não permite que as variáveis endógenas e exógenas sejam aleatórias, além disso, suas características operacionais devem ser relações exatas, e não funções de densidade de probabilidade. Nesse tipo de modelo, a partir de valores iniciais

fornecidos pelo usuário, permite-se acompanhar sua completa evolução no tempo, determinada pela equação analítica que o representa.

- **Modelos estáticos:** estes modelos não levam em conta a atuação da variável tempo em nenhuma das entidades do sistema (independente do tempo). Na maioria das vezes são completamente determinísticos, com soluções normalmente obtidas diretamente pela utilização de técnicas analíticas. Neles, as variáveis que definem o sistema não são dependentes do tempo e nem do espaço.

- **Modelos estocásticos ou probabilísticos:** possuem pelo menos uma de suas características operacionais dada por uma função de probabilidade. São consideravelmente mais complexos que os determinísticos, pois descrevem processos aleatórios, como a distribuição espacial de indivíduos. Um exemplo de aplicação de modelagem estocástica é encontrado na previsão dos efeitos da heterogeneidade do solo na lixiviação de agroquímicos para águas subterrâneas.

- **Modelos dinâmicos:** as variáveis modificam-se com o tempo, tornando-o um fator de grande importância na sua representação. Nesses modelos, o tempo é representado de duas formas, discreta ou contínua. A primeira dá-se pela representação do tempo em instantes definidos em passos constantes em que o comportamento do sistema é apresentado somente nesses instantes coletados no intervalo de tempo total estabelecido para o estudo. Os modelos são representados por equações de diferenças e são chamados de modelos dinâmicos discretos. O sistema dinâmico contínuo apresenta as variáveis do sistema descrevendo variações fornecidas de forma instantânea, devendo ser descritas para todos os instantes de tempo pertencentes ao intervalo total em estudo. Nesse caso, o modelo é representado por equações diferenciais e chama-se modelo dinâmico contínuo.

Por outro lado, de forma geral, a metodologia proposta por Bassanezi e Ferreira (1988) para o processo de modelagem Matemática, que pode ser mais bem observada na Figura 1, inicialmente aborda o estudo de problemas e situações reais buscando um tema de grande relevância. A partir desse estudo, é usado como linguagem para compreensão, simplificação e resolução desse sistema complexo, a modelagem Matemática, por meio da devida escolha das variáveis (de estado, que descrevem a evolução do sistema e de controle, que agem sobre o sistema) e suas relações; e formulação de hipóteses ou “leis”, baseadas em conhecimentos anteriores de fenômenos análogos. Visa-se, com isso, uma possível tomada de decisões com relação ao problema levantado, entendendo da melhor maneira possível o fenômeno biológico. A montagem do modelo matemático “substituindo” a linguagem natural por uma linguagem específica da Matemática é a fase da Resolução, e seu estudo depende da complexidade do modelo, e quando os argumentos conhecidos não são eficientes, novos métodos podem ser criados, ou então o modelo deve ser modificado.

Para aceitação ou não do modelo inicial existe a fase da Validação, que consiste na comparação da solução obtida via Resolução do Modelo com os dados reais, obtidos por meio de experimentos. O grau de aproximação desejado será o fator preponderante

na decisão, e o principal obstáculo para a aceitação de um modelo é a sua praticidade, ele deve envolver novos resultados práticos e justificar as hipóteses ou intuições. A busca do aperfeiçoamento dos modelos propostos é o que dinamiza a modelagem. Após a aceitação do Modelo ele será aplicado na situação real para fazer previsões, tomar decisões, explicar e entender o fenômeno numa linguagem universal, enfim, participar do processo com capacidade de influenciar em suas mudanças. A linguagem oferecida pela Matemática e em especial pelas Equações Diferenciais é fundamental na transferência e no entendimento da linguagem “natural”; uma vez que a palavra-chave variação aparece com muita frequência nos fenômenos (BASSANEZI; FERREIRA, 1988).

Uma vez escolhido o tema o próximo passo é a obtenção de dados experimentais ou empíricos que ajudam na compreensão do fenômeno, na modificação do modelo e na decisão de sua validade. A natureza dos dados obtidos é que, de certa forma, vai orientar a formulação matemática dos modelos. Caberá a essa fase inicial da modelagem caracterizar resultados experimentais mínimos necessários aos softwares que serão utilizados, como dados climáticos locais, dados de perfil do solo, condições e composição inicial do solo, informações sobre a variedade da cana-de-açúcar utilizada no experimento, área foliar etc. (BASSANEZI; FERREIRA, 1988).

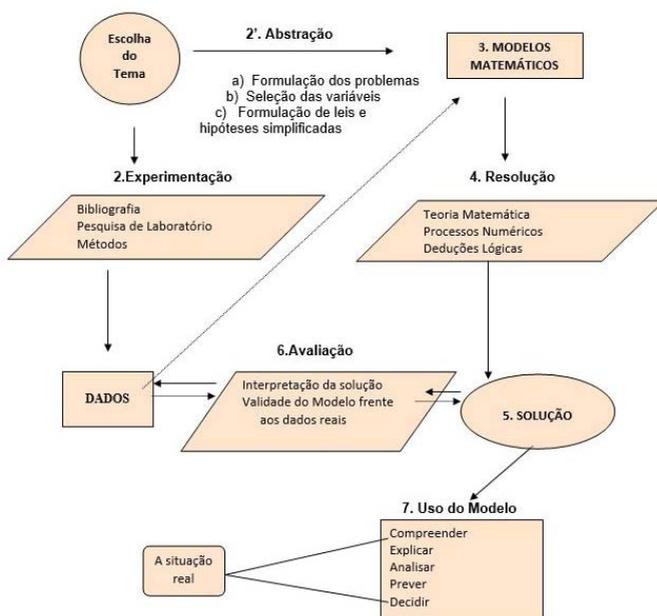


Figura 1. O Processo dinâmico da Modelagem, onde as setas contínuas indicam a primeira aproximação, e as setas pontilhadas indicam o processo dinâmico, que ocorre em virtude da busca de um modelo matemático que melhor descreva o problema estudado.

Fonte: Bassanezi, R. C., Ferreira, Jr., W. C. Equações Diferenciais com aplicações, 1988.

2. Aplicação da modelagem Matemática na agricultura

A produtividade média nacional para a cultura de cana-de-açúcar está na ordem de 73 toneladas de colmo por hectare - TCH (AGRIANUAL, 2010), a qual é influenciada pelo número de cortes, condições edafoclimáticas, variedades e manejo cultural. Uma aplicação de matemática computacional na agricultura é na estimativa da produtividade, a qual pode ser modelada em três níveis, onde cada nível é influenciado por vários fatores, os quais condicionam a cana-de-açúcar (De WIT, 1965 e 1982):

a) *produtividade potencial* - Fatores que definem a capacidade fotossintética da planta para transformar energia solar em biomassa vegetal, tais como CO_2 , radiação, temperatura e características da cobertura vegetal; essa produtividade potencial é definida pela capacidade assimilação do dióxido de carbono (CO_2), para a fotossíntese dessa planta C4, em relação à temperatura e a radiação solar com base na metodologia descrita por Heemst (1986). As variedades cultivadas de cana-de-açúcar são selecionadas com base nos atributos de biomassa, a produção anual poderia chegar a 400 TCH (ALEXANDER, 1985), sendo que valores próximos a esse são considerados como sendo o potencial genético da cultura.

b) *Produtividade real* - fatores que limitam o potencial, sendo a água e os nutrientes os de maior importância e ocorrência; a água é o primeiro fator de restrição à produção potencial, cuja contabilidade no solo é mais utilizada para fins climatológicos. Uma metodologia prática de balanço hídrico é a de Thornthwaite e Mather (1955), que consiste da avaliação entre a precipitação e a evapotranspiração estimado por Penman-Monteith (método padrão - FAO, 2000) e de Doorembos e Kassan (1994), considerando a capacidade de retenção de água no solo, segundo as características físicas dos solos, bem como em função do tipo de cobertura vegetal. Já no cálculo simplificado de Priestley-Taylor requer apenas a temperatura do ar, que é uma alternativa do modelo Cropsyst. O estresse hídrico causa nas plantas a redução nas taxas de assimilação de dióxido de carbono, no tamanho das células foliares, na taxa de transpiração, no potencial de água na planta, na taxa de crescimento e abertura estomática (HSIAO, 1973). Outro aspecto importante é a interferência do déficit hídrico sobre o florescimento, alongação dos perfilhos e altura final dos colmos em cana-de-açúcar (GASCHO; SHIH, 1983). Próximo ao “ponto de murcha permanente”, a fotossíntese pode ser reduzida de 30% a 50% (HARTT; BURR, 1967).

Teruel et al. (1997) estimaram a influência da deficiência hídrica sobre o índice de área foliar (IAF) verificaram que os efeitos da deficiência de água no solo não são lineares, variando conforme o nível de água no solo. Até o somatório de 600 e 400 graus dias não houve efeito pronunciado na porcentagem de crescimento do IAF não

realizado devido à deficiência hídrica na cana planta e na soca, respectivamente. Após esses valores de somatório térmico a porcentagem foi de 12,4% e 5,1% na cana-planta e na soca, respectivamente.

O segundo fator restritivo seria deficiência de nutrientes no sistema solo-planta, que se baseia no balanço de N e na carência de K disponível no solo (SILVA *et al.*, 2005). A maioria dos softwares que integram a família de modelos CERES apresenta o nitrogênio como principal nutriente modelado.

c) Produção atual ou realizada - Fatores de redução, tais como *pestes, enfermidades e contaminação*. No caso da cana-de-açúcar praticamente não se tem pesquisa nesse enfoque, mas a literatura é abundante para restrições por fator biótico para culturas. Na literatura internacional em modelagem da cultura de cana existem três modelos mais conhecidos de simulação (APSIM-Sugarcane, CANEGRO-DSSAT e QCANE) para predição de produtividade de biomassa e de sacarose na cana-de-açúcar (O'LEARY, 2000). Tais modelos se limitam a avaliar os estágios do desenvolvimento vegetativo e da maturação, mas não simulam o balanço do nitrogênio no solo e nem do carbono orgânico, os quais são necessários para o entendimento dos processos dinâmicos no agrossistema (SILVA; BERGAMASCO, 2001).

No Brasil, os trabalhos de modelagem do crescimento da cana-de-açúcar são encontrados em Machado (1981), Barbieri (1993) e Barbieri e Silva (2007), que utilizaram o conceito de graus-dia baseado em temperatura; há outros fatores de clima que afetam a produtividade, como radiação solar e umidade com importância preponderante, são os que afetam mais diretamente a produção e influenciam desde o preparo do solo, aplicação de herbicidas, até a colheita, o transporte e o armazenamento dos produtos (PEREIRA *et al.*, 2002). Recentemente, a análise de Van Den Berg *et al.* (2000) aborda as limitações quanto à absorção de água pelo sistema radicular da cana e as características climáticas (DOOREMBOS; KASSAN, 1994). Estudos que relacionam físicas e químicas do solo são úteis para determinação do potencial produtivo de determinada cultura (BERNARDES *et al.*, 2002; TERAMOTO, 2003; BARBIERI; SILVA, 2007), sendo que as características de solo são tradicionalmente determinadas nas unidades produtoras.

3. Desenvolvimento do modelo de crescimento da cana-de-açúcar

3.1. Abordagem do uso eficiente da radiação (RUE) interceptada

O enunciado da Lei de BEER é: "*um feixe monocromático de radiação ao atravessar um meio homogêneo, sofrerá uma atenuação exponencial*".

Indica como obter a radiação solar instantânea incidente em uma superfície horizontal considerando a atmosfera presente. Por essa lei verifica-se que a radiação ao atravessar um meio isotrópico e homogêneo ela sofrerá uma atenuação exponencial a

qual é função da espessura e do coeficiente de extinção desse meio. Que se expressa matematicamente, como:

$$I = I_0.e^{-kx} \quad (2)$$

I é a irradiância considerada;

I_0 é a irradiância normal

k é o coeficiente de extinção que para uma comunidade vegetal com folhas eretas o seu valor varia de 0,3 a 0,5 e para folhas horizontais varia entre 0,7 a 1,0.

x = distância na qual o feixe atravessa esse meio ou, no caso de comunidade de plantas, deve ser utilizado índice de área foliar (IAF).

Adaptando-se e fazendo a análoga a lei de BEER. Admiti-se que a cana-de-açúcar tem uma distribuição espacial esférica das folhas (De WIT, 1965), e que a radiação solar ao penetrar no dossel, atenua-se conforme a equação proposta por Monsi e Saeki (1953), Inman-Banber e Thompson (1989) e Inman-Bamber (1991), ou seja:

$$I(\text{IAF}) = I_0.e^{-k(\text{IAF})} \quad (3)$$

I(IAF) = radiação transmitida após atravessar um dado índice de área foliar (IAF) (cal/cm². min).

I_0 = radiação solar incidente no topo da cultura. (cal/cm². min)

K = coeficiente de atenuação da radiação solar pelo dossel ou coeficiente de extinção.

De acordo com os dados obtidos por Chang et al (1965) e Inman-Banber e Thompson (1989) e ajustando-os à equação 3, para IAF maiores que 1, BARBIERI (1993) obteve um K = 0,58. De acordo com JONES (1998) o valor de K varia de 0,4 a 0,8.

Considerando-se o modelo esquemático da Figura 2.

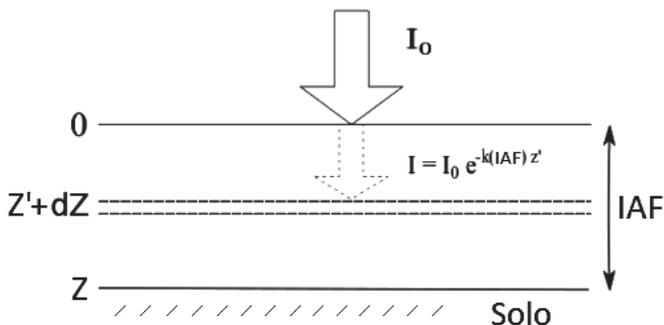


Figura 2. Representação esquemática da radiação solar transmitida pelo dossel.

No nível "z" + dz, a síntese de CH₂O (CB), de acordo com a equação 1 é expressa por:

$$d(\bar{CB}) = \frac{a.Io.e^{-k(IAF)z}}{1 + b.Io.e^{-k(IAF)z}}.d(IAF) \quad (4)$$

Integrando-se a equação 4, a síntese total de CH₂O, para o dossel inteiro.

É a integração de energia transmitida da primeira camada (plena) com as demais camadas de folha do dossel, será:

$$CB_{(IAF)} = \int \frac{a.Io.e^{-k(IAF)z}}{1 + b.Io.e^{-k(IAF)z}}.d(IAF) \quad (5)$$

CIAF = CB (IAF de 0 a 5) / CB (IAF = 5), tem-se a curva de CIAF.

Onde:

CB (IAF) = CH₂O sintetizado por um determinado índice de área foliar (kg/ha.hora)

Io = radiação global incidente no topo da cultura

a, b e K = constantes quantificadas anteriormente

De acordo com a equação 6, determina-se com boa aproximação a produção diária de carboidratos para um dia completamente limpo, cuja fração RFA é aproximadamente 0,4 da Radiação Global, considerando-se um valor médio diário por hora (Ioc), e multiplicando-se este valor pelo numero de horas de brilho solar (N), (comprimento de dia).

Sendo:

$$Ioc = \frac{Qo}{N \cdot 60} = 0,0125 \cdot \frac{Qo}{N} \quad (6)$$

Ioc = radiação solar média para um dia completamente claro (limpo).(cal/cm².min)

Qo = radiação no topo da atmosfera (função da época do ano e da latitude do local) (cal/cm².dia).

FAO n.º 33 (DOOREMBOS; KASSAN, 1994) tem "a" + "b" (Angstrom) = 0,25 + 0,50 = 0,75, que se trata de constante local, considerando-se que 75% da Qo são transmitidas para da cultura.

Para cálculos de eficiência fotossintética, a PAR é considerada uma fração

constante da radiação solar global. A faixa da radiação no comprimento de onda 400 a 700nm, dependendo das condições atmosféricas dominantes, varia entre 44 e 58% do total da radiação incidente (ASSUNÇÃO, 1994) – Figura 3. Com dados de radiação no topo da atmosfera (Q_0), insolação (n) e fotoperíodo (N), Assunção (1994) propôs a seguinte equação para determinar a PAR.

$$PAR = Q_g [(0,399n/N) + 0,501 (1 - n/N)] \text{ cal/cm}^2.\text{dia}$$

Onde:

$Q_g = Q_0 (0,224 + 0,466n/N)$ cal/cm².dia, em que:

Q_0 = radiação no topo da atmosfera; n = insolação e N = fotoperíodo.

A produtividade das plantas, em condições hídricas satisfatórias, está relacionada diretamente à fotossíntese, que tem como fatores limitantes a energia radiante e a temperatura do ar. Na interceptação de luz por um dossel, a diferença entre a radiação solar incidente e radiação refletida pela cultura é determinante no desenvolvimento e fornece a energia necessária para os processos fisiológicos fundamentais, como a fotossíntese e a transpiração (SILVA et al., 2015).

As plantas interceptam a luz solar direta e difusa, o que reflete em ganho de matéria seca (Figura 4), como se observa nos modelos AUSCANE e APSIM. As folhas superiores recebem os dois tipos de radiação, enquanto as folhas inferiores interceptam uma pequena porção de radiação direta. Radiação difusa, por conseguinte, torna-se mais significativa nas folhas inferiores, devido à radiação transmitida e refletida pelas folhas e superfície do solo. Dos 100% de energia recebida pela folha apenas 5% é convertida em carboidrato para a produção de biomassa (CAMPILLO et al., 2012).

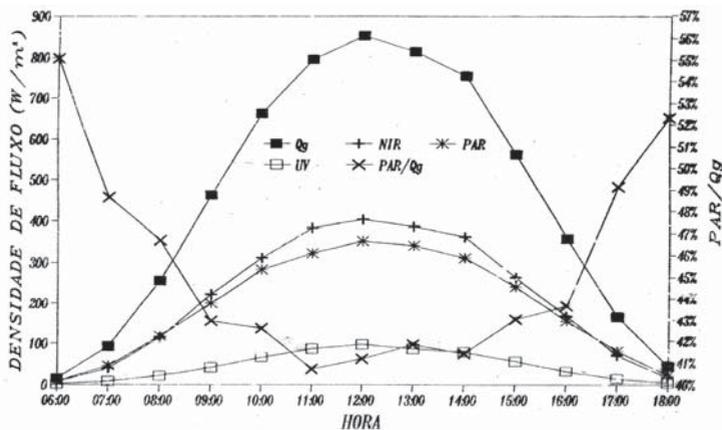


Figura 3. Distribuição espectral horária média e porção fotossintética ativa (n) para um dia com céu completamente limpo. Fonte: Assunção (1994).

Há uma relação estreita positiva entre produção de biomassa (P) e a utilização eficiente da radiação (RUE), o que se dá pela fórmula:

$$P = RUE \times I \quad (1),$$

onde:

P: Produção de Biomassa, g m⁻²;

RUE: Uso eficiente da radiação, g mj⁻¹ e

I: Radiação interceptada, mj m⁻².

Quanto a eficiência da utilização da luz pelas plantas, a taxa de fotossíntese da maioria das folhas cresce conforme aumenta a intensidade luminosa e o tamanho das folhas e a cobertura vegetal do solo. Todavia, a partir de certo ponto, novos aumentos na intensidade de iluminação não são acompanhados por elevação na taxa da fotossíntese. A intensidade luminosa deixa de ser um fator limitante da fotossíntese quando todos os sistemas de pigmentos já estiverem excitados e a planta não tem como captar essa quantidade adicional de luz. Atingiu-se o ponto de saturação luminosa. A saturação da intensidade da luz da cana-de-açúcar é considerada alta, aproximadamente 9,7 W/m² (HARTT, 1965).

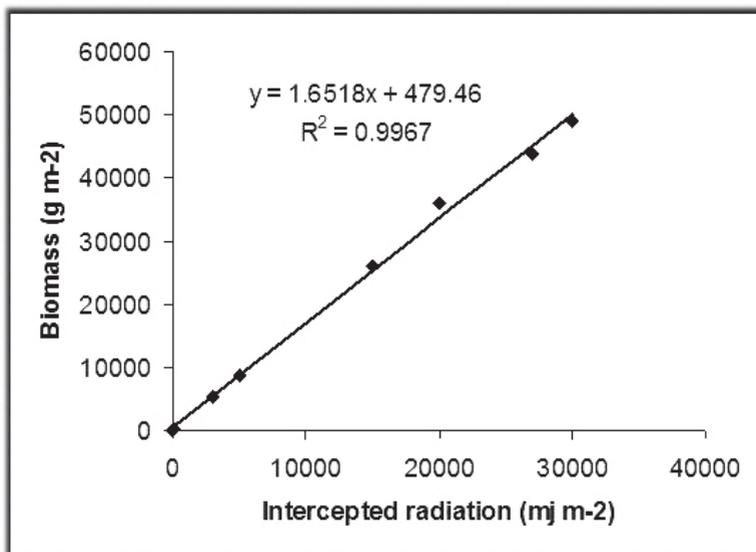


Figura 4. Relacionamento entre a interceptação da radiação luminosa (luz) com elevação de biomassa, como observado nos modelos AUSCANE e APSIM-Sugar.

Outro aspecto de eficiência do uso de energia (RUE) interceptada pela cultura poderia mudar em função de: a) Mudanças pode ocorrer nas práticas de gerenciamento agrícola, b) Mudanças no água e nutrientes do solo alteram significativamente as condições de crescimento. O RUE para muitas culturas foi reportado para ser reduzido quando as condições ambientais não forem favoráveis para o crescimento da cultura. Dentre fatores mais afetam o crescimento destacam-se os efeitos da temperatura; b) água no solo e c) nitrogênio na planta. Para cálculos de eficiência fotossintética, a PAR é considerada uma fração constante da radiação solar global. A faixa da radiação no comprimento de onda 400 a 700nm, dependendo das condições atmosféricas dominantes, varia entre 44 e 58% do total da radiação incidente (Assunção, 1994). Com dados de radiação no topo da atmosfera (Q_0), insolação (n) e fotoperíodo (N), Assunção (1994).

3.2. Modelos de fotossíntese-respiração

Os modelos que utilizam o conceito: BrCane e QCane. De acordo com Pereira (1987) e Glover (1972), a produção de carboidrato da cana-de-açúcar para simular por modelo matemática fisiológico requer um balanço diário de carbono de uma comunidade vegetal, cujo modelo utiliza conceitos de respiração, de crescimento e de manutenção, os integrados com fotossíntese no processo de crescimento da cultura, simulando-se a massa seca dos colmos e folhas, especulando-se, de que maneira quantitativa, os desvios do carbono após a sua fixação pelas plantas, num canavial.

O primeiro passo seria conhecer a assimilação de CO_2 pela cana, que se utilizando de dados fisiológicos de Bull (1969), a temperatura do ar e ao IAF foram considerados de 23oC e 25oC, respectivamente e a idade de 2 meses após plantio.

Há uma relação estreita da produção de biomassa e a área foliar para fazer a fotossíntese, o que se expressa no índice de área foliar (IAF), os valores de produção de carboidratos pela planta depende do IAF variando de 0 a 5, e biomassa para IAF igual a 5, promoverá a maior produtividade, resulta na seguinte função, que depende dos valores de IAF observados no ciclo, que depende das unidades térmicas acumuladas no período (Figura 5).

Tendo o $R^2 = 0.952^{**}$, cuja representação está na Figura 5.

Quando $CIAF > 1$, então se considera 1.

O requerimento hídrico da cana-de-açúcar é influenciado por fatores inerentes às condições ambientais, técnicas agrícolas, período de plantio e cultivares, normalmente reduzindo com a sucessão dos ciclos de cultivo (cana-planta, cana-soca e ressoça), o que explica porque apresentar-se variações entre as regiões de produção (PACHECO et al., 1983; DOORENBOS; KASSAM, 1979; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; FARIAS et al., 2008). Tal demanda hídrica das plantas é governada pelos balanços de radiação e de energia à superfície da cultura, que permitem conhecer a partição da energia disponível em fluxo de calor sensível e latente (ASSENG; HSIAO, 2000). Esta partição de energia é obtida por meio de métodos micrometeorológicos (STEDUTO et al., 1998; TODD et al., 2000; GAVILÁN; BERENGENA, 2007;

TEIXEIRA et al., 2008), que fornecem informações sobre a evapotranspiração da cultura (ETc) e, em seguida, através da relação ETc/ETo (sendo, ETo, a evapotranspiração de referência), permitem obter o coeficiente de cultivo (Kc) a ser utilizado no manejo de irrigação (MIRANDA et al., 2006; BARBIERI; SILVA, 2007; TEIXEIRA et al., 2007). Dentre os métodos mais utilizados se destaca o balanço de energia com base na razão de Bowen ou associando se a energia acumulada em graus dias – Figura 5 (BARBIERI; SILVA, 2007; SILVA et al., 2011).

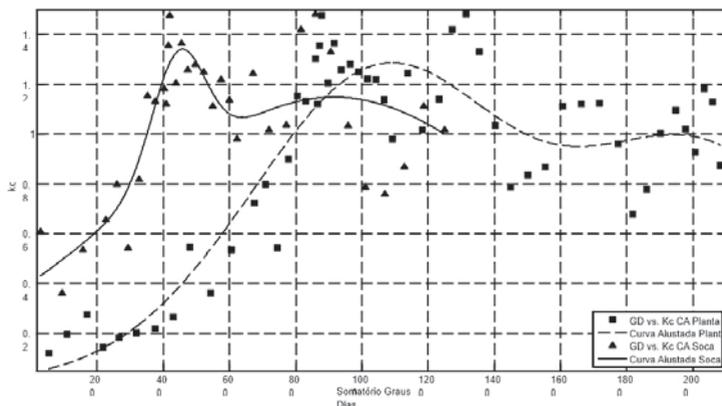


Figura 5. Demonstração gráfica da dependência da relação do coeficiente de cultura (eixo Y) em relação a Soma de Graus-dia (eixo X) na cana-planta e cana-soca (BARBIERI; SILVA, 2007).

A função que permite a estimativa de IAF foi obtida através dos dados medidos por Machado (1981), Barbieri (1993) e Leme (Araras), ao longo do ciclo da cultura, correlacionados com os valores de “GRAUS DIA”, calculados pelas seguintes equações:

Sendo para $T_b < T_m$:

O cálculo do GDD é realizado segundo o seguinte critério:

Quando $T_m > T_b$, então: (3) Quando $T_m \leq T_b$, então: (4)

$$GDD = \left(\frac{TM + Tm}{2} \right) - Tb \qquad GDD = \frac{(TM + Tb)^2}{2(TM + Tm)} \qquad (5)$$

Em que GDD é o acúmulo de graus dias; TM é temperatura máxima diária; Tm é a mínima temperatura diária; Tb é a temperatura basal.

Segundo Bachi e Souza (1978) a temperatura basal para o crescimento da cultura da cana-de-açúcar é de 18°C. Os valores de GDD para cada dia devem ser corrigidos com a taxa entre o comprimento do dia em horas e às 12 horas da seguinte forma:

$$GDD_{st} = GDD * N/12 \quad (6)$$

onde,

GD = graus dia mensal (OC.dia)

TM = temperatura máxima média mensal (OC)

tm = temperatura mínima média mensal (OC)

tb = temperatura base (18OC) Bachi e Souza(1978)

n = nº dias do mês

A correlação entre estes valores (IAF x Σ GD) resultou em funções para cana-planta, soca e ressoca. O índice de área foliar (IAF, m².m⁻²) foi calculado para cada um dos dias do ciclo conforme metodologia descrita por Teruel et al. (2003) para cana-planta (IAF_{cp}) e cana soca (IAF_{sc1}) e ressoca (IAF_{sc2}).

$$IAF_{cp} = e^{-13,521} (\Sigma GDD_{st})^{2,784} e^{-0,004023 \Sigma GDD_{st}}, r^2 = 0,58.$$

$$IAF_{sc1} = e^{-17,707} (\Sigma GDD_{st})^{3,373} e^{-0,004265 \Sigma GDD_{st}}, r^2 = 0,88.$$

$$IAF_{sc2} = e^{-20,207} (\Sigma GDD_{st})^{3,832} e^{-0,004936 \Sigma GDD_{st}}, r^2 = 0,80.$$

Os argumentos da modelagem de processo fotossíntese pressupõem se que:

- A assimilação diária de CO₂ é calculada a partir da taxa de fotossíntese a qual é função da interceptação de luz. A taxa de fotossíntese não é diretamente afetada pela temperatura (INMAN-BAMBER, 1991).
- A respiração de manutenção é função da biomassa acumulada.
- O tamanho da cobertura é tratado tanto como pela abordagem da cobertura máxima (JONES et al., 1989) ou é uma proporção da matéria seca total (MISHOE et al., 1979) considerando as mudanças ambientais.
- A acumulação de sacarose é calculada a partir da matéria seca de colmo usando um índice de colheita que designa a fração de matéria seca de colmo acumulada (INMAN-BAMBER, 1991) ou uma proporção diária do crescimento diário de colmo (KEATING et al., 2003) para a acumulação de sacarose.

Segundo Alfonsi et al. (1987), a luz é um fator da maior importância para a cana-de-açúcar devido à alta eficiência fotossintética da cultura. Quanto maior for a intensidade luminosa mais fotossíntese será realizada. Para Silva Junior (2001), a luz não influi diretamente na germinação mas o perfilhamento é favorecido por alta intensidade luminosa e o número de brotos vivos depende da quantidade de luz incidente. O teor de sacarose no caldo é diretamente influenciado pela quantidade de

luz e o crescimento do colmo aumenta para comprimento de dias de 10 a 14 horas e diminui em condições de fotoperíodos longos de 16 a 18 horas (SILVA JUNIOR, 2001). A cana-de-açúcar é muito menos sensível ao fotoperíodo, em comparação ao sorgo sacarino, soja e amendoim. Tal sensibilidade faz que semeadura do sorgo sacarino possa ser realizada entre outubro e dezembro, pois semeaduras tardias apresentam menor produtividade devido ao fotoperíodo induzir florescimento precoce.

3.3. O papel da temperatura do ar

Um dos padrões biogeográficos mais importantes da Terra é a relação entre a temperatura, estação de crescimento e a distribuição geográfica das plantas. A temperatura influencia vários processos do desenvolvimento vegetativo, tais como crescimento das raízes, absorção de nutrientes e de água, fotossíntese, respiração e translocação (COELHO; DALE, 1980). Essas características determinam a espacialização geográfica de cada espécie, como por exemplo, as plantas C4 que se tornam menos frequentes com o aumento da latitude e altitude (SAGE, R. F.; KUBIEN, 2007).

Um dos métodos utilizados para relacionar a temperatura do ar e o desenvolvimento vegetativo é o total de graus-dia acumulados (GDA), definido como a soma de temperaturas acima da condição mínima e abaixo da máxima necessária para a planta finalizar os diferentes subperíodos de desenvolvimento (SOUZA, 1990). O GDA foi desenvolvido para superar inadequações do calendário diário, identificar as melhores épocas de semeadura, escalonar a produção de culturas e para programas de melhoramento (WARINGTON; KANEMASU, 1983). Conforme Barbieri et al. (1979) o crescimento dos colmos se ajustam perfeitamente com os GDA quando não há deficiências hídricas ou nutricionais, sendo que nesta pesquisa também determina que a temperatura basal seria de 19°C para cultura.

Fatores de produção agrícola para agricultura de alta produtividade

Há diversos fatores que afetam processos fisiológicos que definem a produtividade da cultura da cana-de-açúcar. Nesse caso, foi escolhido um conjunto deles, os quais seriam a espécie e cultivar de culturas anuais e suas épocas de plantio (soja, amendoim, sorgo sacarino entre outros) na reforma do canavial, zoneamento, arranjo, espaçamento e população de plantas para o plantio com colmos semente ou mudas pré-brotadas.

1. Zoneamento de áreas potencialmente aptas para o plantio de soja, amendoim, sorgo sacarino e girassol na época de reforma do canavial.

Para a recomendação sobre áreas de risco climático para o cultivo de soja e amendoim em diferentes períodos do ano foram observadas pela integração espacial entre o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et al., 2009) e o zoneamento de risco climático para as culturas anuais. As áreas aptas para a adoção do sistema de produção de cana-de-açúcar em rotação com o cultivo da soja e amendoim são mostradas na Figura 6.

O plantio nas áreas de renovação do canavial propicia à cultura principal, entre outros benefícios, a redução da infestação de plantas daninhas, além de deixar resíduos de nutrientes no solo, contribuindo para reduzir os custos de implantação.

A produção de oleaginosas, especialmente a soja e amendoim, é uma oportunidade para intensificar o uso do solo e apresenta várias vantagens para o cultivo de cana-de-açúcar como o controle de ervas daninhas e o aumento da eficiência dos fertilizantes, particularmente nitrogênio adquirido pela fixação biológica.

No caso do plantio de amendoim em rotação com a cana, é necessário que as cultivares sejam de ciclo compatível com a duração do período de renovação do canavial.

Já no caso de sorgo sacarino, foi estabelecido um zoneamento de áreas potencialmente aptas para o plantio na época de entressafra de cana-de-açúcar proposto por Elena Charlotte Landau e Robert Eugene Schaffert pressupondo a obtenção de Brix mínimo desejado para viabilizar economicamente a geração de etanol durante o período de interesse. O zoneamento resultou da integração espacial do zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et al., 2009), informação de que o período de entressafra da cana-de-açúcar ocorre predominantemente entre outubro e dezembro, e de mapas reunindo os municípios considerados aptos para o plantio de milho de ciclo normal em solo argiloso entre os meses de outubro e dezembro (BRASIL, 2011). Observa-se que as áreas com maior aptidão concentram-se no Estado de São Paulo, noroeste do Estado do Paraná, leste do Estado do Mato Grosso do Sul e sudoeste do Estado de Goiás. As maiores partes das áreas com aptidão intermediária concentram-se nos Estados de Minas Gerais e Goiás. Este zoneamento representa uma primeira aproximação, considerando informações atualmente disponíveis sobre as culturas. Informações sobre a demanda.

Ressalva-se que o Boletim No. 200 do IAC recomenda que o sorgo sacarino possa ser realizado entre outubro e dezembro, pois sementeiras tardias apresentam menor produtividade devido ao fotoperíodo induzir florescimento precoce.

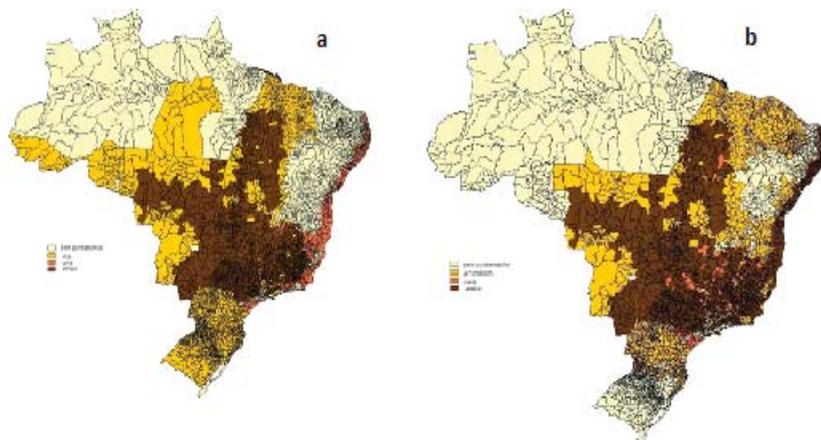


Figura 6. Zoneamento das áreas aptas ao cultivo de soja (a) e amendoim (b) na reforma do canavial.

2. Cultivo de Amendoim e Soja em plantio direto na reforma do canavial

O estudo das características do clima e do solo, gerando cenários para os sistemas de produção através de zoneamentos agroecológicos, permitem a seleção de áreas de produção de cana-de-açúcar aptas ao cultivo de oleaginosas como soja e amendoim no período de reforma (Figura 6).

Tais estudos são necessários para que se disponibilizem aos gestores das unidades de produção sucroalcooleira informações úteis sobre a introdução de culturas anuais no momento da reforma do canavial. Embora a semeadura direta da soja em palhada de cana já seja uma realidade, contribuindo para a redução da compactação e da degradação do solo, as áreas de reforma de cana são, de modo geral, submetidas a preparo intenso de solo com arados e grades de discos para eliminação mecânica da soqueira de cana e correção da fertilidade, notadamente calagem.

Para a viabilização da rotação de culturas oleaginosas com a cana-de-açúcar nas áreas em reforma (Figura 6), como as épocas de semeadura de soja (Figura 7), é desejável que a cultivar de soja tenha, como nota-se nas Tabelas 1 e 2, além de um bom desempenho agrônomo, adaptação às condições de solo e clima, refletindo em bom crescimento, facilidade com os tratos culturais e colheita e ciclo compatível com o cronograma de plantio da cana-de-açúcar.

Os resultados mostram que no município de Promissão - SP o rendimento da cana/amendoim (plantio direto e plantio convencional) foi ligeiramente superior a cana/soja. Para a construção da curva de calibração de biomassa e índice de área foliar do amendoim e soja (Figuras 8 e 9) utilizou-se o coeficiente de particionamento foliar como sendo igual a 0,78 (NAAB et. al, 2004) e a área foliar específica igual a 24 m²/kg

(PINTO, 2006). Para a calibração da curva de calibração de biomassa da soja (Figura 10), utilizou-se o coeficiente de particionamento foliar igual a 1,26 (MARENCO; LOPES 1996) e a área foliar específica de 38 m²/kg (ALAMBERT et al, 2010).

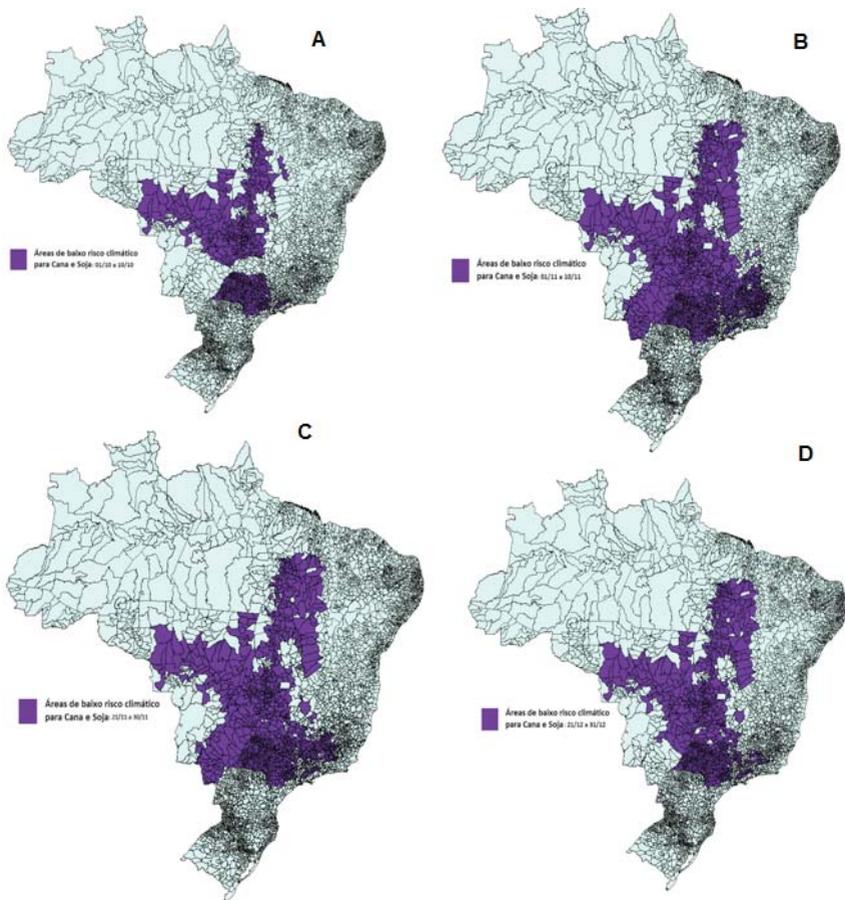


Figura 7. Zoneamento de áreas aptas para cultivo de soja na reforma do canavial nas diferentes épocas do ano: **A** - 01 a 10/10; **B**-01 a 10/11; **C**- 21 a 30/11; e, **D** – 11a 21/12).

Fonte: Silva et al. (2013)

Tabela 1. Avaliação de produtividade, em toneladas de cana por hectare -TCH, de oito cultivares de soja cultivadas em área de reforma de canavial em unidades de observação implantadas em agroindústrias na Safra 2009/2010.

Variedades / Local e Usina	Aporé, GO Nardini	Guaira, SP Colorado	Guaira, SP Guaira	Guaira, SP Mandu	Clementina, SP Clealcool	Araçatuba, SP UO	Média
BRS 232	3.780	3.834	3.128	3.592	2.749	5.765	3.808
BRS 282	2.760	-	-	-	2.964	4.781	3.502
BRS 283	2.700	3.584	2.622	3.643	-	-	3.137
BRS 284	2.400	3.238	2.689	3.684	3.060	5.340	3.402
BRS 294 RR	3.360	3.322	2.700	2.511	-	5.563	3.491
BRS 295 RR	3.600	-	2.539	2.675	2.503	4.453	3.154
BRS 750RR	3.420	-	-	-	1.583	4.578	3.194
Favorita RR	3.060	-	-	-	1.077	3.047	2.395
Média	3.135	3.494	2.735	3.221	2.323	4.790	3.260

Tabela 2. Avaliação da produtividade (kg/ha) de cultivares de soja e amendoim cultivadas em áreas de reforma (safra 2011/2012).

Sistema de cultivo	Renuka Promissão, SP	Usina Guaira Guaira, SP	UsinaColombo/ Apta Pindorama, SP	Usina Viralcool Castilho, SP	Media
Cultivares de Soja (média de 5 cultivares)					
Plantio Direto	3100 (225*)	3828 (295)	3500 (575)	2796 (753)	3306
Convencional	----	3533 (413)	3389 (235)	2173 (630)	3032
Cultivar de amendoim					
Plantio Direto	4141 (328)	-----	2779 (298)	-----	3460
Convencional	4241 (210)	-----	2392 (129)	-----	3316

* Em parêntesis, desvio padrão da média.

Houve produtividade acima de três dígitos (> 100 TCH) na cana-planta em área de plantio direto associado à rotação de oleaginosas na reforma, o que proporcionou um ganho de 10 a 15% de aumento na produtividade nas quatro regiões testadas, em comparação ao pousio e ao preparo de solo convencional.

A produtividade de cana-planta oriunda de parcelas dos tratamentos de rotação de soja e amendoim em plantio direto foram na ordem de 110 toneladas por hectare, com uma variação superior de 10 a 15 toneladas (Tabela 3) em relação aos tratamentos com pousio e preparo convencional, no município de Pindorama - SP. Já em os resultados da cana cultivada nos tratamentos com plantio direto de amendoim e soja foram superiores ao convencional e pousio, com produção de 95 toneladas por hectare, no município de Promissão - SP. A mesma tendência ocorreu nos ensaios conduzidos para tratamento com PD soja em Guaíra e Castilho, em comparação ao preparo convencional associado ao pousio da área.

Tabela 3. Avaliação da produtividade da cana-planta cultivada nas áreas de cultivo de soja e amendoim em plantio convencional e direto nas áreas de reforma (safra 2012/2013).

<i>Sistema de cultivo</i>	Renuka/ Promissão / SP	Usina Guaíra / Guaira SP	Usina Colombo/Apta Pindorama, SP	Usina Viralco ol /SP	Media
----- Produtividade da cana-planta, em TCH -----					
Reforma com cultivo de soja					
Plantio Direto	92	115	110	112	107,2
Convencional (pousio)	---	95	97	92	94,7
Reforma com cultivo de amendoim					
Plantio Direto	95	-----	108	-----	101,5
Convencional (pousio)	83	-----	95	-----	89,0

Nas Figuras 8, 9 e 10 são mostrados os resultados da calibração da biomassa e do índice de área foliar (IAF) para a cultura de cana-de-açúcar, a partir da plataforma de simulação CropSyst, referentes as safras de 2008/2009, 2009/2010 e 2010/2011 respectivamente. A temperatura base para desenvolvimento da cultura foi estabelecida em 18°C, sendo a mesma mencionada em trabalhos desenvolvidos por Barbieri et al (2010). A temperatura limite foi fixada em 34°C, como recomendada em trabalhos desenvolvidos por Tatsch et al (2009). Para a construção das curvas utilizou-se os Parâmetros das **Tabelas 4 e 5**. Os resultados encontrados se aproximam dos obtidos por Pinto et al, (2005) que encontrou 13,48 e 15,73 m².kg-1 para a área específica (Tabela 3). As figuras 10, 11 para amendoim e a soja na figura 12 mostram a calibração

da biomassa e do índice de área foliar (IAF) para a cultura do Amendoim (*Arachis hypogaea*) e da soja (*Glycine max*) a partir da plataforma CropSyst.

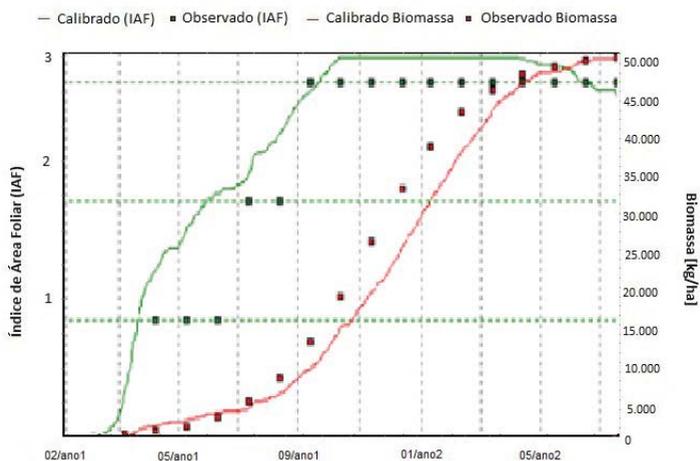
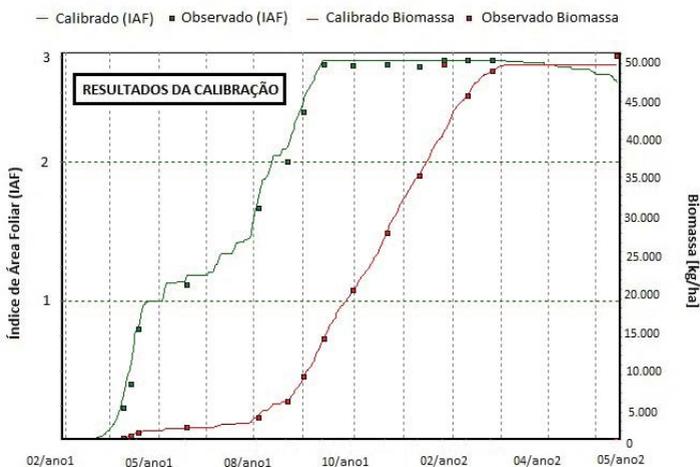


Figura 8. Curvas de calibração de biomassa e índice de área foliar para a cana-de-açúcar, Safra de 2008/2009, as informações climáticas foram coletadas do banco de dados das estações meteorológicas do Agritempo, nas áreas experimentais.



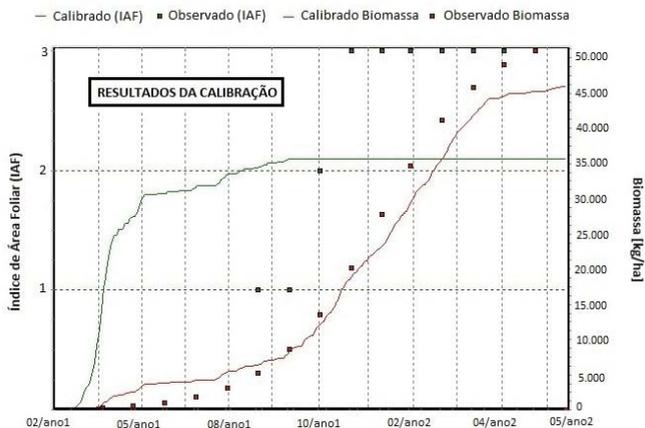


Figura 9. Curvas de calibração de biomassa e índice de área foliar para a cana-de-açúcar, Safra de 2009/2010, as informações climáticas foram coletadas do banco de dados das estações meteorológicas do Agritempo, nas áreas experimentais.

Tabela 4: Parâmetros gerados pelo ajuste do programa cropsyst para soja.

Período	Área Específica (m ² .kg ⁻¹)	Coefficiente de Particionamento (adm)
2008/2009	12,06	3,06
2009/2010	15,11	3,06
2010/2011	10,18	3,18

Tabela 5: Parâmetros obtidos para a calibração da biomassa, em matéria seca.

Período	Calibrada (kg.ha ⁻¹)	Experimental (kg.ha ⁻¹)
2008/2009	53.617,4	53.584,0
2009/2010	47.895,7	50.891,0
2010/2011	49.807,1	53.093,0

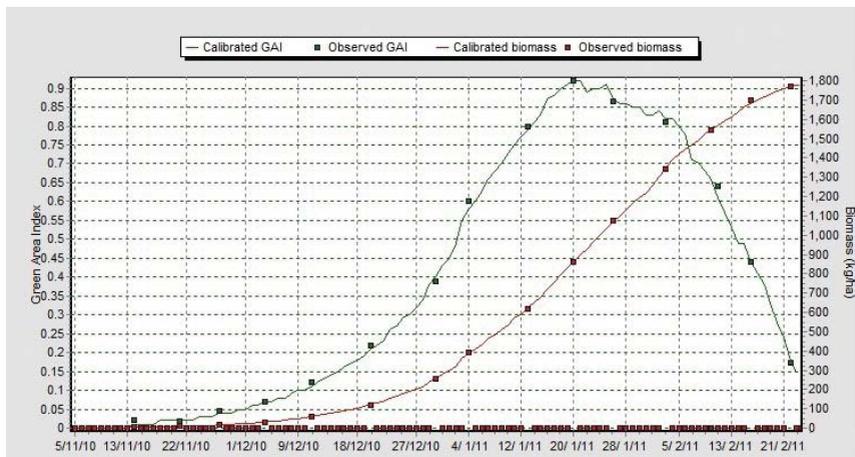


Figura 11. Curva de calibração de biomassa e índice de área foliar para a cultura do amendoim (*Arachis hypogaea*), experimentalmente cultivada na área de domínio da usina Colombo em Pindorama – SP.

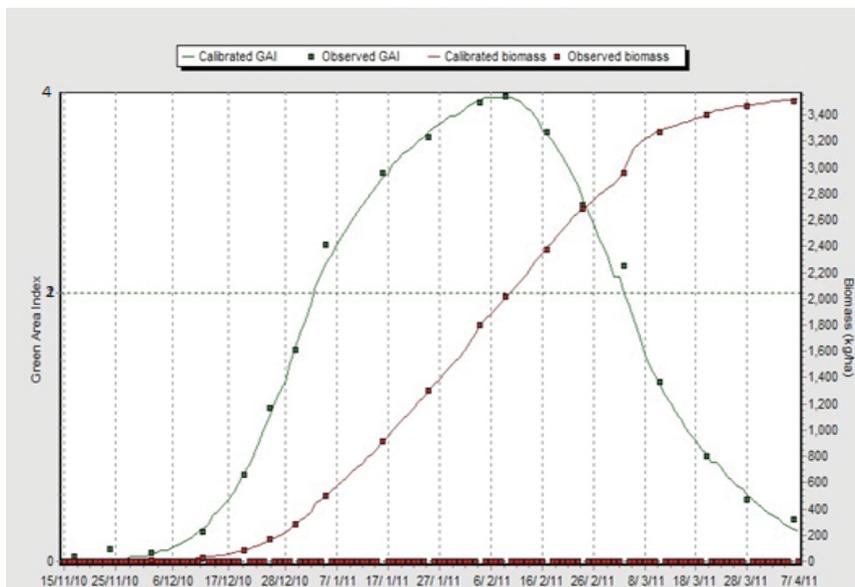


Figura 12. Curva de calibração de biomassa e índice de área foliar para a cultura da soja (*Glycine max*), experimentalmente cultivada na área de domínio da usina Colombo em Pindorama – SP.

A temperatura base para desenvolvimento da cultura foi estabelecida em 18°C, sendo a mesma mencionada em trabalhos desenvolvidos por Barbieri et al (2010). A temperatura limite foi fixada em 34°C, como recomendada em trabalhos desenvolvidos por Tatsch et al (2009).

Para a construção das curvas utilizou-se os Parâmetros da Tabela 4 e 5. Os resultados encontrados se aproximam dos obtidos por Pinto et al, (2005) que encontrou 13,48 e 15,73 m².kg⁻¹ para a área específica. Em relação ao cultivo de soja em áreas de reforma que vieram sendo conduzidas no sistema de cana-crua, Finoto et al. (2012), trabalhando com a cultivar BRS 242 RR em Pindorama SP, concluíram que os tratamentos onde não se efetuou o preparo do solo durante a reforma, ou seja, em plantio direto sob o palhiço residual da cana-de-açúcar, obtiveram produtividades superiores, comparado ao tratamento com o preparo convencional do solo. Esse resultado foi observado pelos autores não somente onde se efetuou a dessecação antecipada da soqueira, mas também onde essa operação foi realizada no mesmo dia da semeadura da soja, ou mesmo após a semeadura da cultura, o que proporciona uma possibilidade de se efetuar a semeadura da soja, imediatamente após o último corte da cana-de-açúcar. É importante também ressaltar que as produtividades de soja nesse trabalho variaram de 2.622 a 3.533 kg ha⁻¹.

3. Cultivo de Sorgo sacarino na reforma do canavial

A utilização do sorgo sacarino na reforma do canavial apresenta algumas vantagens como ciclo curto, fácil mecanização, alto teor de açúcar, produção de massa verde, além de o processamento ser idêntico ao da cana- de- açúcar. O objetivo foi determinar a melhor época da semeadura, como o melhor tratamento quanto à adubação, buscando uma alta produtividade de massa verde e bom índice de sacarose. Os experimentos foram realizados no campo em quatro épocas diferentes (Setembro, Outubro, Novembro, Dezembro), com três tratamentos e quatro repetições: T1-Adubação convencional (super simples-250 kg.ha-1), T2-Torta de Filtro (20 t.ha-1) +vinhaça (60 m3. ha-1), T3-torta de filtro (20 t.ha-1). Após vinte dias foi realizada adubação de cobertura em todos os tratamentos com a formulação 10-20-20(200 kg.ha-1) e uréia (200 kg.ha-1). De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que os tratamentos apresentaram diferenças entre si dentro de cada época, bem como as épocas apresentaram valores diferentes para as variáveis estudadas, Pol%, massa verde e produção de fibra. Observou-se também, diferenças na altura das plantas na ocasião da colheita em relação aos tratamentos e às épocas.

De acordo com os resultados obtidos por Marchiori et al (2016b), conclui-se que os tratamentos apresentaram diferenças entre si dentro de cada época, bem como as épocas apresentaram valores diferentes para as variáveis estudadas: Pol% colmo (Figura 13), massa verde e produção de fibra. Houve diferenças na altura das plantas na ocasião da colheita para tratamentos e as épocas. O período útil de industrialização (PUI) deve ser de pelo menos 30 dias com valores de Brix acima de 14,5 e corresponderia

uma pol acima 13%, que representa valores de ART (açúcares redutores totais) acima de 12,5% e extração de açúcar superior a 80 kg t⁻¹.

A produção de massa verde variou entre 48,59 t.ha⁻¹ e 51,34t.ha⁻¹(MARCHIORI et al., 2016), sendo que o Boletim No. 200 do IAC recomenda uma produtividade de colmos e etanol, ou seja, atenderia o mínimo aceito pelas indústrias sucroenergéticas para uma cultivar de sorgo sacarino é 50 t ha⁻¹ de colmos (biomassa sem panículas) e resultando em produtividade final acima de 2.500 L ha⁻¹ de etanol.

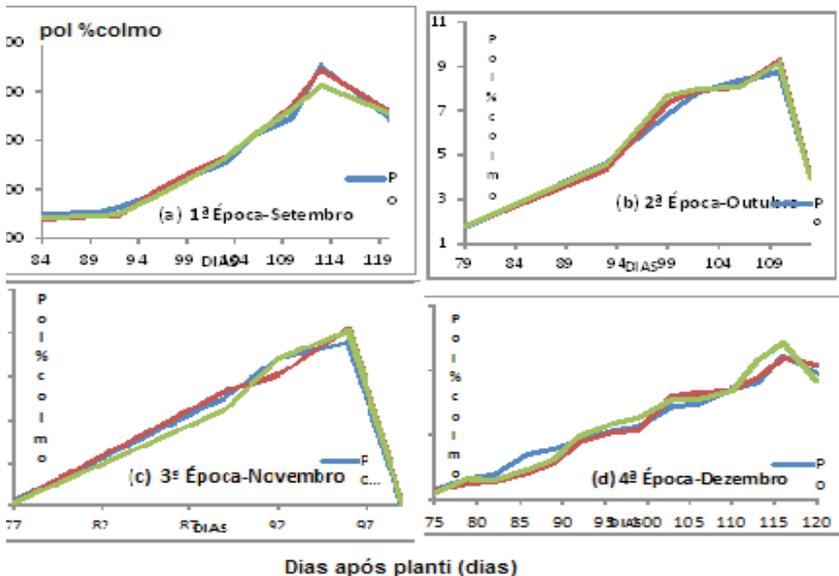


Figura 13. Influência da época de semeadura na curva de acumulação de sacarose nos colmos de sorgo sacarino nos diferentes tratamentos (pol % colmo): (a) 1ª época - setembro; b - 2ª época - outubro; c - 3ª época - novembro e d) 4ª época - dezembro/2013.

4. Arranjo e espaçamento para cana-de-açúcar por MPB

4.1 Arranjo e espaçamento em plantas em colmos semente.

Para avaliar a influência da mudança no espaçamento e no arranjo entre plantas na produtividade e na qualidade da cana-de-açúcar para produção de etanol ou açúcar foi instalado um experimento em área de reforma de canavial na área agrícola da Usina Renuka - Unidade Madhu, localizada em Guaíçara - SP. O experimento foi instalado em blocos ao acaso com parcelas com largura de 8 linhas de comprimento de 15 metros e 6 repetições, sendo os tratamentos: T1 - Convencional (1,5m x 1,5m); T2 - Duplo (0,9m x 1,5m); T3 - Base Larga (0,8m x 1,8m) e T4 - Base Larga (0,8m x 2,0m).

Analisando-se os resultados na Tabela 6 em relação a produtividade da cana-de-açúcar, os valores apresentados na cana-planta não apresentaram diferença estatística de acordo com a metodologia utilizada. Os resultados de produtividade encontrados nesta foram maiores que a média para o estado de São Paulo (74.714 kg/ha-1, na safra 2012/2013). Para a questão do perfilhamento da cana-de-açúcar, vale ressaltar que a longevidade do canavial está diretamente relacionada à uniformidade dos perfilhos e ao não tráfego de máquinas sobre a cultura. Os valores amostrados para perfilhamento e altura, apresentaram baixa oscilação para os tratamentos, sendo apenas considerado diferente no teste de Tukey o espaçamento 0,90 x 1,50m, que se mostrou superior aos demais na quantidade de perfilhos. O diâmetro médio dos colmos não apresentou diferença entre os tratamentos para cada época de amostragem na cana-planta e na cana-soca (Tabela 7). O mesmo foi observado para os valores médios de altura da planta (Tabela 6 e 7). Assim como a média em produção e número de colmos por área dos componentes de rendimento foram significativamente iguais de acordo com o teste de Tukey nos espaçamentos duplos e simples, a média do espaçamento duplo 0,90 x 1,50m para perfilhamento.

Na cana-soca, por sua vez, como se observa na colheita da cana-soca há diferença estatística entre médias dos tratamentos para produtividade - TCH, número de perfilhos por metro e TAH (Tabela 7), em especial para tratamento de duplo alternado (0,90 x 1,50) para desenvolvimento e formação da produção da cultura (perfilhamento e produtividade). Para ressoca não houve diferença entre tratamentos para perfilhamento, diâmetros ou altura da planta nas diferentes épocas, mas houve diferentes produtividades, em toneladas por hectare, para a sequência de tratamentos: T2 (125,3 A) > T1 (93,6 B) > T4 (90,3 BC) e T3 (82,0 C). Vale ressaltar que o ensaio está instalado em transição de solo, o que pode levar a certa variabilidade dos resultados.

Quanto ao efeito dos tratamentos na qualidade agrotecnológica da matéria prima, tem-se que uma comparação dos dados de Brix, Pureza, Pol, Fibra e ATR em três fases do experimento, início de safra (127 dias), meio (174 dias) e final (356 dias) para cana-planta, soca e ressoca, foram realizados ajustes de médias dos valores, e os resultados significativos, onde se encontra os ajustes de médias dos valores de Pureza (%) com relação ao tempo de acordo com cada tratamento estudado (T1, T2, T3 e T4).

Tabela 6. Resultados das médias para os tratamentos para variáveis de produção de agrícola no primeiro corte na cana-planta, colhida em Dezembro de 2013 por máquina.

Análise Variância Tukey a 5%	TCH (t. cana.ha ⁻¹)	Perfilhos/m (n°)	Diâmetro Colmos (cm)	Altura Colmo (m)	Peso Colmos (Kg)	Perdas Campo (t. cana.ha ⁻¹)
Sulcos Simples (1,50m)	102,15 a	13,70 b	2,15 a	2,91 a	1,58 ^a	3,75a
D. Alt. (0,90m x 1,50m)	92,52 a	29,67a	2,09 a	2,68 a	1,38 a	5,62 a
Base Larga (1,80m)	97,35 a	12,73 b	2,17 a	2,89 a	1,50 a	2,97 a
Base Larga (2,00m)	104,70 a	14,40 b	2,23 a	2,57 a	1,52 a	2,54 a
GL RESÍDUO	19	19	19	19	19	19
F TRATAMENTOS	2,97	79,76**	0,72	1,96	1,5	1,55
MÉDIA GERAL	99,18	17,63	2,16	2,76	1,5	3,72
DESVIO PADRÃO	7,65	2,22	0,17	0,29	0,17	2,67
DMS 5%	12,42	3,6	0,28	0,47	0,28	4,34
CV %	7,71	12,59	7,98	0,46	11,51	51,95

Tabela 7. Resultados das médias para os tratamentos para variáveis de produção de agrícola no segundo e terceiro cortes, na soqueira colhida mecanicamente em dezembro de 2014 e 2015.

Tratamentos	TCH (t ha ⁻¹)	Perfilhos/m	Peso de Colmos Kg/metro linear	Diâmetro Colmos (cm)	Altura Colmo (m)	ATR (Kg/TC)	TAH (T/ha)	Perdas Campo (t. cana.ha ⁻¹)
Cana-soca (2º corte)								
Sulcos Simples (1,50m)	83,2	10,25B	9,9	2,31	2,81	101,27	6,82B	3,85
Duplo Alt. (0,90m x 1,50m)	102,1	16,75A	8,5	2,43	2,58	98,62	7,90B	5,55a
Base Larga (1,80m)	72,8	11,3B	10,5	2,43	2,77	106,57	13,19A	3,17a
Base Larga (2,00m)	77,5	13,05AB	12,7	2,46	2,44	100,26	9,04AB	2,58
Ressoca (3º Corte)								
Sulcos Simples (1,50m)	93.5 B	17.0	18.1	2.19	2,68	104.76	9.84 B	3,87
DA (0,90m x 1,50m)	122.5A	15.3	17.5	2.10	2,65	99.50	12.47A	5,15
BL (1,80m)	82.0C	15.3	16.2	2.19	2,70	101.14	8.35C	3,47
BL (2,0m)	90.3BC	17.2	17.8	2.13	2,54	101,45	9.16BC	3,25
Análise Variância / Teste de Tukey a 5%								
F TRATAM	NS./ *	*/NS	NS	NS	NS	NS	*	*
DMS 5%	38,54	3,875	2,763	0,320	0,48	9,417	3,57	4,34
CV %	18,72	11,01	11,57	5,16	4,57	28,1	16,3	32,5

Podemos perceber com esta análise que os 4 tipos de tratamento tenderam a apresentar no início da safra uma diferença significativa apenas para o Tratamento 2, em especial para no início da safra (127 dias) com aumento significativo em relação aos demais tratamentos (SILVA et al., 2013), quanto mais elevados os teores de sacarose, melhor para a indústria canavieira. Quanto a Fibra não houve diferenças significativas para tratamentos.

4.2 Influência de arquitetura e população de mudas pré brotadas (MPB)

Foram avaliados os efeitos de diferentes arranjos de plantas (espaçamento e população de mudas pré brotadas) na produtividade de cana-de-açúcar, bem como em outros aspectos agrônômicos. Para tanto, um experimento foi planejado e executado pela EMBRAPA, em parceria com as empresas BASF e PHD Cana/Grupo Zilor, implantado em meados de setembro de 2014. Foi considerado o delineamento experimental de blocos ao acaso em parcelas subdivididas em esquema fatorial (variedade x preparo do solo/espaçamento). Foi estudada a influência do fator variedade na interceptação de luz diferenciada em função da arquitetura de folha (prostradas/ CTC 9001 ou eretas/ CTC 9003), sendo cada parcela subdividida em 4 subparcelas com espaçamentos entre MPBs de 40, 55, 70 e 85 cm. A recomendação da distância entre mudas foi de 0,55 e 0,70 m, mas a principal informação é a capacidade de suporte do ambiente em receber uma população acima de 100 mil colmos na colheita, sendo a população ideal de MPB variável com as variedades de distintas arquiteturas de folhas que chegaram as populações de 11500 a 13000 plantas para folhas mais prostradas (CTC 9001) e de 15000 para folhas mais eretas (CTC 9003). Em relação ao preparo do solo, foram obtidos maiores valores de produtividade os tratamentos sob o sistema Penta em relação ao sistema convencional.

Verificou-se que a CTC 9003 apresentou melhores perfilhamentos por metro linear ou quadrado, assim como, na parcela como um todo, mensurado nas duas linhas centrais, em comparação a CTC 9001 (Tabela 8). As folhas de plantas que se mantêm na posição mais vertical são denominadas erectófilas, erectas ou lanceoladas (NOBEL et al., 1993), como a variedade CTC 9003 e essa característica de angulação da folha promoveria uma distribuição mais homogênea da radiação solar no dossel, durante a fase vegetativa do ciclo, o que permitiria uma maior incidência de luz no estrato inferior do dossel, na capacidade fotossintética e na senescência das folhas localizadas naquela posição (MARCHIORI et al., 2014). A maximização da captura de energia luminosa pelo dossel da planta ocorre quando cada colmo possui um número ótimo de folhas e quando há uma quantidade ideal de colmos por área, o que pressupõem se populações de mudas adequadas (Figura 14), sendo essas características variáveis de acordo com o ambiente de produção, variedade e idade da planta (TEJERA et al., 2007).

Há influência da população de MPB na produtividade da cana-de-açúcar, em duas variedades de distintas arquitetura foliares, que chegaram populações adequadas de mudas diferentes para os ensaios instalados: 11500 a 13000 plantas para folhas mais

prostradas (CTC 9001) e de 15000 para folhas mais eretas (CTC 9003), como destacaram Silva et al (2016c). O espaçamento de plantio utilizado nas culturas deve ser definido em função da maximização do índice de área foliar (IAF) relacionado com a interceptação da radiação solar (TEJERA et al., 2007), e plantas cultivadas que possuem diferenças varietais na arquitetura foliar sugere a adoção de espaçamento de plantio diferente do habitualmente utilizado (CAMPBELL et al., 2001). O aumento do IAF em função do adensamento de plantio favorece a interceptação da radiação solar, mas pode reduzir a produtividade da cultura em resposta à queda da fotossíntese global da planta (CAMPBELL et al., 2001). Por outro lado, aumento de produtividade pode ser obtido em função do adensamento de plantio em plantas com arquitetura de folhas mais eretas.

Os subtratamentos com as menores distâncias entre mudas (0,40 a 0,55 m) foram os de maiores valores em perfilhamento, em comparação a maiores distâncias entre as plantas (0,70 e 0,85 m) (Tabelas 8 e 9), valores observados na colheita. Para cana-de-açúcar diferenças de produtividade são encontradas em função do espaçamento de plantio utilizado (Figura 14), e a produtividade de algumas variedades é favorecida com espaçamento de plantio adensado, como se observa amplamente na literatura (BELL; GARSIDE, 2005). Ressalta-se que nos estudos conduzido na produção com ou sem queimada do canavial, se conhece sobre a influência direta da arquitetura foliar sobre a produtividade das plantas (MARCHIORI et al., 2014), e possivelmente razões associadas as características varietais. Nos resultados de presente experimento, esses fatores se refletiram na produtividade de colmo e de gemas, onde se observou que à arquitetura foliar mais ereta das plantas (CTC 9003) resultou num maior número de colmos e gemas. A recomendação da distância entre mudas foi entre 0,55 e 0,70 m (Figura 14).

Tabela 8. Análise de Variância: Teste de Tukey para médias de manejo fitotecnia (Trat A) para produção de gemas, diâmetro médio e cana-de-açúcar (pol, ATR e TAH), na colheita da cana-planta.

Causa Variação	Total Gemas/ha	Diâmetro	Pol %cana	ATR	TAH
S Simples (1,5)	1 377 661 AB	0.185	15.09A	149.5A	10.87A
Duplo Alt (0,90X1,5)	1 481 712 A	0.175	14.88AB	147.4 AB	9.50 B
Duplo Alt (0,90X1,5) PENTA	1 313 982 B	0.170	14.52B	144.1B	8.75 B
DSM a 5%	232 478	0.0487	0.495	3.522	1.029

Tabela 9. Análise de Variância: Teste de Tukey para médias de manejo fitotecnia da diferença varietal (Trat B)

para produção de gemas, diâmetro médio e açúcar de cana (pol, ATR e TAH), na colheita da cama-planta.

Causa Variação	Produtividade	Peso Total	Peso, sem Palha	Peso Líquido	No. colmo	No. Gemas/2TC	ATR	TAH
CTC 9001	59.7B	96.7	85.08	73.2B	72460B	252.7 B	149.1A	8.91B
CTC 9003	72.3A	129.3	101.0	90.7 A	90446 A	287.4 A	144.9B	10.51A
DSM a 5%	4.60	34.4	16.38	13.77	5907	29.5	3.12	0.695

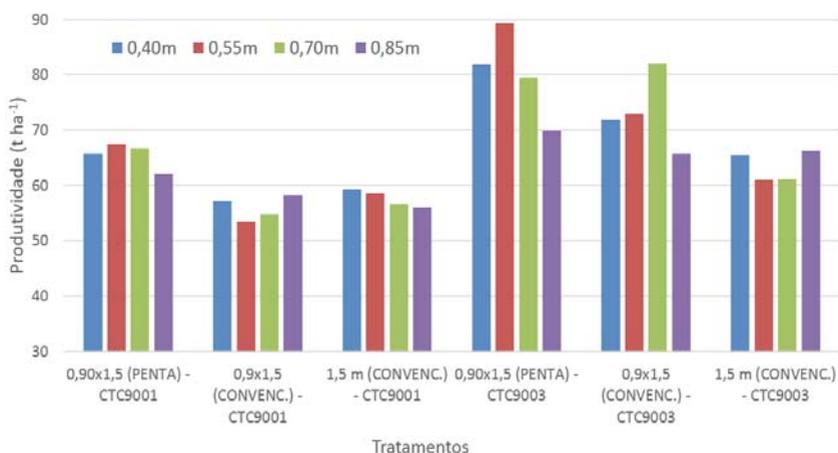


Figura 14. Produtividade agrícola da cana de açúcar sob influência dos sistemas de preparo do solo (Penta e Convencional), variedades (CTC9001 e CTC9003), e distância entre as MPB na produtividade (0,40, 0,55, 0,70 e 0,85 m).

Conclusões

A variedade CTC 9003 apresentou melhores perfilhamentos por metro linear, ou quadrado, independente dos tratamentos em comparação a CTC 9001. De modo geral, o tratamento duplo alternado (0,90 x 1,5) mostrou-se superior ao convencional (espaçamento simples a 1,5m) promovendo melhores perfilhamentos por metro linear ou quadrado, assim como, na parcela como um todo - mensurado nas duas linhas centrais. Os subtratamentos com as menores distâncias entre mudas (0,40 a 0,55 m) foram as de melhores perfilhamentos no estabelecimento da cultura, em comparação a maiores distâncias entre as plantas (0,70 e 0,85 m). Entretanto ao fim do ciclo os tratamentos que obtiveram os maiores números de perfilhos e produtividade foram os

de 0,55 e 0,70 m entre mudas. Em relação ao preparo do solo, foram obtidos maiores valores de produtividade os tratamentos sob o sistema Penta.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem afirmar que a produção de sorgo sacarino pode ser uma cultura complementar na produção de etanol e energia na entressafra da cana-de-açúcar, cabendo em alguns casos, dois ciclos da cultura no período da entressafra quando se planta cana de ano-e-meio. Viabilizando assim a utilização das áreas de reformas de canaviais, propiciando uma oferta de matéria prima para produção de etanol na entressafra da cana de açúcar e utilização do parque industrial da usina nesta época, já que os mesmos ficam parados na entressafra. Isso proporcionará aumento da eficiência no uso destes equipamentos.

Referências

- AGRIANUAL: **anuário da agricultura brasileira**. São Paulo: FNP, 2010. 520 p.
- ALAMBERT, M. R. **Estimação estocástica de parâmetros produtivos da soja: uso do modelo PPDSO em um estudo de caso em Piracicaba/SP**. 2010. 108f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Economia de São Paulo, 2010.
- ALEXANDER, A. G. **The energy cane alternative**. Amsterdam; New York: Elsevier, 1985. 509 p.
- ALFONSI, R. R. PEDRO JÚNIOR, M.J. BRUNINI, O; BARBIERI, V. **Condições climáticas para a cana-de-açúcar**. In: PARANHOS, S.B. (Coord). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas, fundação Cargill, 1987, v.1, p.42-55.
- ASSENG, S., HSIAO, T. C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. **Field Crops Research**, v.67, p.191-206, 2000.
- ASSUNÇÃO, H. F. **Relações entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação solar global em Piracicaba/SP**. 1994. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BACCHI, O. O. S.; SOUZA, J. A. G. C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 1978, São Paulo, SP. Proceedings... São Paulo, 1978, v. 2, p. 1733-1741.
- BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 142 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 1993.
- BARBIERI, V.; SILVA, C. F.; DIAS-AMBRONA, C. G. H. Modelagem de cana-de-açúcar para previsão de produtividade de canaviais no Brasil e na Austrália. **CAI**, v. 39, p. 745-762, 2010.
- BARBIERI, V.; SILVA, F. C. da Adequação do método da zona agroecológica (FAO) para estimativa do acúmulo mensal potencial de matéria seca da cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) e da produtividade agrícola para diferentes condições climáticas. Anais... XVI

- Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 02 a 05 de Julho de 2007. Aracaju – SE.
- BARBIERI, V; BACCHI, O.O.S., VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOLOGIA, 1979, Mossoró-RN. **Anais...** Mossoró-RN, 1979.
- BASSANEZI, R. C.; FERREIRA JUNIOR, W. C. **Equações diferenciais com aplicações**. São Paulo: Ed. Harbra, 1988. 572 p.
- BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, 92: 231-248. 2005.
- BERNARDES, M. S.; TERAMOTO, E. R.; BARBOSA, M.; SADER, S. L. Comparação entre a produtividade real e simulada através do modelo matemático, avaliada em cinco variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, n. 2, v.1, p. 44, 2002.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional**: ano base 2011: ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 244p.
- BULL, T.A., 1969. Photosynthesis efficiencies and photorespirations in Calvin cycle and C4 - dicarboxylic acid plants. **Crop Sci.**, vol. 9, pp. 726-729. 1969.
- CAMPBELL, C.S., HEILMAN, J.L., MCINNES, K.J., WILSON, L.T., MEDLEY, J.C., WU, G., COBOS, D.R. Diel and seasonal variation in CO2 flux of irrigated rice. **Agric. For. Meteorol.**, n. 108, pp. 15–27. 2001.
- CAMPILLO C.; FORTES, R.; PRIETO, M. DEL HENAR. **Solar radiation effect on crop production**. In: BABATUNDE, E. B. Solar radiation. 2012. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/solar-radiation/solar-radiation-effect-on-crop-production>>. Acesso em: 15 maio 2015.
- CHANG, J. **Climate and agriculture: in ecological survey**. Chicago, Aldine, 1968, 304p.
- COELHO, D. T.; DALE, R. F. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: planting to silking. **Agron. J.**, n. 72, p. 503-510, 1980.
- DE VRIES, F. W. T. P.; LAAR, H. H. van (Ed). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. 309 p. (Simulation monographs).
- DE WIT, C. T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57p. (Agriculture Research Report , 663).
- DE WIT, C. T. **Simulation of living systems**. In: DE VRIES, F. W. T. P.; van LAAR, H. H. (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 3-8. (Agriculture Research Report, 538).
- DE WIT, C.T.; BROUWER, R.; DE VRIES, F.W.T.P. **The simulation of photosynthetic systems**. In: SETLIK, I. (ed.). Prediction and Measurement of Photosynthetic. Wageningen - Pudoc. p. 47-70. 1970.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H. et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e

drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.** (Riego e Drenaje). Boletim. Roma: FAO, n. 33, 1979. 212p.

FINOTO, E.L.; BOLONHEZI, D.; SOARES, M.B.B.; MARTINS, A.L.M. Produção de soja RR e ocorrência de plantas daninhas em áreas de reforma de cana crua com diferentes manejos na destruição da soqueira. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n. 2, 2012.

GASCHO, G.J., SHIH, S.F. **Sugarcane.** In: TEARE, I.D., PEET, M.M. Crop-water relations. New York: John Wiley, Cap. 14, p.445-479, 1983.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007.

GLOVER, J., Practical and theoretical assessments of sugarcane yield potential in Natal. Proc. **S. Afr. Sug. Technol.** v.46, p. 138-141, 1972.

HARTT, C.E. Light and translocation of C4 in detached blade of sugar cane. **Plant Physiology**, v. 40, p. 718-24, 1965.

HARTT, C.E.; BURR, G.O. Factors affecting photosynthesis in sugarcane. INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12., 1967. Proceedings, Cartagena de Indias: Celam, 1967. p. 590-609.

HEEMST, H. D. J. van. **Crop phenology and dry matter distribution.** In: KEULEN, H. van; WOLF, J. (Ed.). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen, PUDOC, 1986, p. 27-40.

HSIAO, T.C. Plant response to water stress. **Plant Physiology**, n.24, p.519-570, 1973.

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, Pretoria, v.8, p. 93-99, 1991.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits, **Field Crops Research**, v. 92, p.185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; THOMPSON, G.D., 1989. Models of dry matter accumulation by sugar-cane. **Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.** 63, 212-216.

JONES J.W.; TSUJI, G.Y., HOOGENBOOM, G.; HUNT, L.A., THORNTON, P.K.; WILKENS, P.W.; IMAMURA, D.W.; BOWEN, W.T.; SINGH, U. **Decision support system for agrotechnology transfer** - DSSAT v3. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.). Understanding Options for Agricultural Production, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 157-177. 1998.

JONES, C. A., WEGENER, M. K., RUSSELL, J.S., MCLEOD, I. M., WILLIAMS, J. R. **AUSCANE – Simulation of Australian sugarcane with EPIC.** CSIRO Australia, Division of Tropical Crops & Pastures Technical Paper No. 29, CSIRO, Brisbane, 1989. 99 p.

KEATING, B. A., CARBERRY, P. S., HAMMER, G. L., PROBERT, M. E., ROBERTSON, M. J., HOLZWORTH, D., HUTH, N. I., HARGREAVES, J. N. G., MEINKE, H., HOCHMAN, Z., MCLEAN, G., VERBURG, K., SNOW, V., DIMES, J. P., SILBURN, M., WANG, E., BROWN, S., BRISTOW, K. L.,

- ASSENG, S., CHAPMAN, S., MCCOWN, R. L., FREEBAIRN, D. M., SMITH, C. J., An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **Agronomy Journal**, Madison., v. 18, 267–288, 2003.
- LEFFELAAR, P.A. **Basic elements of dynamic simulation**. On system analysis and simulation of ecological processes, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1993), pp. 11-27.
- MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)**, 1981. Tese (Doutorado) – Instituto de Biologia. Unicamp. Campinas, SP: UNICAMP, 1981. 115 p.
- MANZATTO C V; ASSAD, E D; BACCA, J F M; ZARONI M J; PEREIRA S E M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Embrapa Solos: Documentos, 110).
- MARCHIORI, L. F. S.; ARTHUR, V.; SILVA, F. C. da; RAPOSO, M. S.; SILVA, G. S. P. L. da; GOIA, T. G. Determinação da dose letal de irradiação em gemas germinadas de cana de açúcar (*Saccharum spp.*). In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: STAB, 2016a. p. 89-91.
- MARCHIORI, L. F. S.; STENICO, L.; SILVA, F. C. da; CAMPOS, K. P. R. de. Avaliação da produtividade agrotecnológica do sorgo sacarino em diferentes épocas de semeadura e sistema de plantio na reforma do canavial. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016b, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: STAB, 2016. p. 259-262.
- MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; RIBEIRO, R.V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 155, p. 30–37, 2014.
- MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. Assimilate partitioning and phytotoxicity in soybean plants treated with herbicides. **Planta Daninha** [online]. 1996, vol.14, n.1, pp. 48-54.
- MIRANDA, F. R.; GONDIM, R. S.; COSTA, C. A. G. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.). **Agricultural Water Management**, v. 82, p. 237–246, 2006.
- MISHOE, J. W., J. W. JONES, and G. J. GASCHO. Harvesting scheduling of sugarcane for optimum biomass production. **Transactions of the ASAE**, 22.6 (1979): 1299-1304.
- MONSI, M. e SAEKI, T., 1953. Über den lichfaktor in denpflanzenengesellschaften und seine bedeutung für diltstoffproduktion. **Jap. J. Bot.**, vol 14, 1953. p. 22-52.
- NAAB, J.B.; SINGH, PIARA; BOOTE, J.W; JONES, J.W.; MARFO, K.O. Using the CROPGRO Peanut Model to Quantify Yield Gaps of Peanut in the Guinean Savanna Zone of Ghana. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 5, p. 1231-1242, 2004.
- NOBEL, P.S.; FORSETH, I.N.; LONG, S.P. Canopy structure and light interception. In: HALL, D.O.; SCURLOCK, J.M.O.; BOLHAR-NORDENKAMPF, H.R.; LEEGOOD, R.C.; LONG, S.P. (Eds.). **Photosynthesis and production in a changing environment**. London: Chapman &

Hall. 1993. p.79-90.

O'LEARY, G. J. A Review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, v. 68, p. 97-111, 2000.

PACHECO, P.; ALONSO, N.; GUITIÉRREZ, A. **A study of the sugar cane evapotranspiration in Cuba. In: Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists**, 18, 1983, Ciudad de La Habana. Proceedings... Ciudad de La Habana: Society of Sugar Cane Technologists, 1983. p.380- 387.

PEREIRA, A. R. Simulação do crescimento e da produtividade. In: SIMPOSIO SOBRE O MANEJO DE AGUA NA AGRICULTURA, 1987, Campinas, SP. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 200-9.

PEREIRA, R. P.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: EMBRAPA–CNPMA, 1997. 83 p. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 8).

PINTO, H. S.; ZULLO JR, J.; ASSAD, E D. E AVILA, A. M. H. DE. Global warming and future Brazilian agriculture scenarios. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BIOMETEOROLOGY, 17., 2005, Garmisch, Partenkirchen. Anais... Germany: Deutscher Wetterdienst, 2005. p. 223-226.

SAGE, R. F.; KUBIEN, D. S. The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 1086-1106. 2007.

SILVA JUNIOR, L. D. **Estádio de desenvolvimento exigências da cultura da cana-de-açúcar**. UNIVAG, Centro Universitário. 2001. Disponível em: <<http://www.univag.com.br/artigos/artigo007.htm>>. Acesso em: 15 maio 2009.

SILVA, F. C. da; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Revista Biociências**, v. 7, n. 1, 2008

SILVA, F. C. da; ANTONIOLLI, A.; ZOTELLI, H. B.; BORGES, L. A.; FREITAS, P. L. de; DONAGEMMA, G. K.; CUADRA, S. V.; CARVALHO, J. R. P. de; PIRES, R. F. Avaliação da produtividade agrícola da cana planta e as soqueiras sob diferentes espaçamentos e arranjos entre plantas. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirao Preto. Anais... Ribeirao Preto: STAB, 2016a. p. 65-69.

SILVA, F. C. da; CASTRO, A.; FREITAS, P. L. de; VIEIRA JUNIOR, P. A.; FINOTO, E. L. Modelagem de sistemas de produção e previsibilidade da produtividade de biomassa energética e de alimentos em rotação na reforma do canal, na plataforma Cropsyst. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: STAB, 2016b. p. 127-132.

SILVA, F. C. da; CUADRA, S. V.; RODRIGUES, G.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FREITAS, P. L. de; ROSSETTO, H. C. P.; HIPOLITO, G. Influência da arquitetura do dossel, espaçamento

entre linhas e distância entre mudas pré-brotadas na produtividade agrotecnológica da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: STAB, 2016c. p. 245-248.

SILVA, F. C. da; DÍAZ-AMBRONA, C. G. H.; ITURRA, A. R. **Desarrollo sostenible de la producción de Bioetanol y Azúcar**: a partir de la cana de azúcar. Saarbrücken: Editorial Academica Espanola, 2013. v. 1. 436p.

SILVA, F. C. da; MARCHIORI, L. F. S.; FREITAS, P. L. de; FARIAS, J. R. B.; SILVA, C. J. da. Zoneamento de áreas de reforma de cana para a produção de biocombustíveis a partir da soja na região Centro-Sul. **Alcoolbrás**, São Paulo, n. 138, p. 63-68, 2012.

SILVA, F.C. da; ALVES, B.J.R.; FREITAS, P.L.de (Ed.Técnicos). **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Volume 1. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2015. Volume 1, 586 p.

SILVA, L. D. B. da; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.705-712, 2005.

SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. DE; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B. de; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.139-147, 2011.

SOUZA, P. R. Alguns aspectos de influência do clima e temperatura sobre a cultura do arroz irrigado no Sul do Brasil. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 43, n. 389, p. 9-22, 1990.

SOUZA, R. P.; MACHADO, E. C.; SILVA, J. A. B.; LAGÔA, A. M. M. A.; SILVEIRA, J. A. G. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 51, pp. 45-56. 2004.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.89, p.169-184, 1998.

TATSCH, J. D.; BINDI, M.; MORIONDO, M. A **Preliminary Evaluation of the Cropsyst Model for Sugarcane in the Southeast of Brazil**. In: BIND, M. I; BRANDANI, G.; DIBARI, C.; DESSI, A.; FERRISE, R.; MORIONDO, M.; TROMBI, G. (Org.). Impact of climate change on agricultural and natural ecosystems. Florença: Firenze University, 2009. p. 75-84.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, v.94, p.31-42, 2007.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; MOURA, M. S. B. SOARES, J. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.

148, p. 1524-1537, 2008.

TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; Campos, R.; Lluch, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v.102, p.64–72, 2007.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 86 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JUNIOR, L.A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p.39-44, 1997. Número especial.

THORNLEY, J.H.M., 1976. **Mathematical Models in Plant Physiology**. A quantitative approach to problems in plant and crop physiology. Academic Press, London. 318 p.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Drexel Institute of Technology, v. 8, n. 1, p.1-14, 1955.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.335–348, 2000.

VAN DEN BERG, M, B. P. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in Sao Paulo State, Brazil. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 81, p. 43-55, 2000.

WARINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T. Corn growth response to temperature and photoperiod, 1, seedling emergence, tassel initiation and anthesis. **Agronomy Journal**, Madison, n. 75, p. 154-180, 1983.

WHISLER, F. D., ACOCK, B., BAKER, D. N., FYE, R. E., HODGES, H. F., LAMBERT, J. R., REDDY, V. R. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in agronomy**, 40, 141-208.