

CAPÍTULO 26

26 SISTEMA IRRIGADO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: MÉTODOS, RECOMENDAÇÕES E RESPOSTA PRODUTIVA

Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira

Resumo

Diversos tipos de equipamento de irrigação são empregados no setor sucroenergético. O carretel enrolador, autopropelido, é o mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento. Mas, como o custo operacional por milímetro aplicado pode ser mais de dez vezes superior ao do pivô ou gotejamento, ele não é indicado para sistema irrigado de produção. Os pivôs são amplamente utilizados para produção irrigada em grandes áreas. Enquanto o pivô central fixo é recomendado para suprimento de lâminas maiores em uma mesma área, o pivô central rebocável e linear são recomendados para ampliar a área coberta com um único equipamento, mas em detrimento da redução de lâmina aplicada em cada área, em estratégias de irrigação deficitária com atendimento inferior a 30% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta inferior a 3 mm dia⁻¹. Pivôs centrais fixos são recomendados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento de 30 a 60% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta entre 3 e 5 mm dia⁻¹. O gotejamento subsuperficial é o sistema com maiores eficiências de aplicação e de produtividade da água, e facilita as práticas de fertirrigação e quimigação. É recomendado para cobrir grandes áreas, com máximo aproveitamento de terra, máxima verticalização de TAH em estratégias de irrigação deficitária, e para atendimento superior a 50% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta superior a 5 mm dia⁻¹. A magnitude e distribuição da demanda hídrica e de irrigação da cana-de-açúcar é influenciada pelo padrão de clima e precipitação da localidade, e por variações intra- e interanuais desse padrão, inclusive causados pelas mudanças climáticas globais. Também influenciam os aspectos genéticos e fisiológicos de cada variedade, a fase fenológica, a capacidade de armazenamento de água do solo, a época de plantio e colheita, além das práticas agronômicas. Na média, precisa-se de 100 mm de ETr para produzir de 5 a 15 toneladas de colmo, com produtividade da água entre 100 e 150 kg mm⁻¹, a depender da variedade, ambiente de produção e manejo agronômico. Em cenário de 650 mm de ETr, típico do Cerrado, para se produzir um TCH maior que a faixa de 65-95 toneladas, precisa-se adicionar água via irrigação, e aproveitar melhor a ETc que a baixa Pef não permitiu converter em ETr. No Cerrado, estratégias de irrigação deficitária para elevar em 40% o TAH e em quase 100% a longevidade do canal demandam aplicação de 300 a 1.000 mm em 12 meses de cultivo. A maioria dos insucessos de principiantes no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar deve-se a dois aspectos: (i) não ajustar as práticas agronômicas, simplesmente replicando as práticas de sequeiro e adicionado água, e (ii) falhas no manejo de irrigação. Uma análise detalhada dos métodos e parâmetros de manejo disponíveis na literatura mundial e brasileira é realizada nesse capítulo. Recomenda-se o manejo da irrigação de cana-de-açúcar pelo método combinado, que adota o método via clima como base, mas conjuga a umidade do solo e sensoriamento da planta como camadas adicionais de informação e aferição. O capítulo ainda recomenda parâmetros customizados para o método combinado nas áreas de produção moderna do Cerrado, além de compartilhar dicas e informações para escolher as melhores estratégias de manejo e maturação (*drying-off*), fruto de informações da literatura brasileira e mundial,

além da experimentação e experiência acumuladas nos últimos 10 anos. Uma ampla revisão de respostas produtivas da cana-de-açúcar à adoção do sistema irrigado é apresentada. Pela primeira vez, apresenta-se os resultados recém compilados de experimento de longa duração realizada pela Embrapa Cerrados, que apresentou média acumulada de 8 cortes e 12 variedades de 162 para TCH e 138 para ATR. A evolução do domínio da estratégia de *drying-off* possibilitou atingir valores de ATR na área irrigada no mínimo iguais, mas frequentemente superiores às áreas de sequeiro, com ganhos adicionais acima de 10 toneladas de açúcar por hectare, por ano. Com exceção da estratégia de atendimento de 100% da irrigação total necessária, todas estratégias de irrigação deficitária resultaram em ganhos de produtividade da água, com variedades mais responsivas auferindo ganhos superiores a 50%. Para o Cerrado, a estratégia de reposição de 75% da irrigação total necessária resulta no melhor equilíbrio entre potencial produtivo e sustentabilidade do uso da água. Por isso, recomenda-se exclusivamente a adoção de estratégias de irrigação deficitária. Em nenhuma hipótese recomenda-se reposição de 100% da demanda hídrica da cultura. Finalmente, o capítulo aborda aspectos para execução racional de um plano de investimento em sistema irrigado de produção sustentável, inclusive abordando aspectos não convencionais, mas fundamentais para uma análise de viabilidade mais ampla, coerente, e mais aderente com os resultados de fato atingíveis.

26.1 Introdução

A transição de fração da produção de cana-de-açúcar brasileira do sistema de sequeiro para o irrigado não é mais dúvida. Mas, a velocidade dessa transição dependerá, além da saúde financeira das empresas, da difusão das inovações tecnológicas em sistema irrigado acumuladas na última década e da multiplicação de vitrines tecnológicas e áreas piloto em escala comercial, para evidenciar os resultados possíveis.

Além de fazer ampla revisão da literatura brasileira e mundial, esse capítulo conjuga a experiência acumulada nos últimos 10 anos de pesquisa em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Cerrado, para recomendar tipos de equipamento de irrigação, métodos e parâmetros de estimativa de demanda hídrica e de irrigação, métodos de manejo da irrigação, definição de estratégias de irrigação e maturação (*drying-off*). Adicionalmente, relata-se, em primeira mão, um compilado de resultados de experimento de longa duração com 8 cortes e 12 variedades no Cerrado. Finalmente, recomenda-se estratégias para execução de um plano de investimento e análise de viabilidade de sistema irrigado de produção sustentável.

26.2 Tipos de sistema de irrigação para cana-de-açúcar

São diversos os tipos de equipamento de irrigação utilizados na cultura de cana-de-açúcar. Os mais relevantes serão abordados a seguir.

26.2.1 Carretel enrolador

O carretel enrolador, também chamado de autopropelido, é o sistema mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento. Com adutoras móveis e bombeamento à diesel, permitem, com pouca infraestrutura, grande mobilidade e aplicação de pequenas lâminas em grandes áreas. Por outro lado, sua limitação de movimento em canavial adulto e seu custo operacional por milímetro aplicado o tornam incompatíveis com as maiores lâminas e diversas aplicações ao longo do ano, aspectos fundamentais para um sistema irrigado de produção.

O custo operacional por milímetro aplicado com carretel enrolador pode chegar a ser dez ou mais vezes superior ao custo por milímetro aplicado com pivô ou gotejamento. No entanto, o carretel enrolador possui menor custo de capital e maior robustez para trabalhar com vinhaça e água residuária, raramente sendo substituído por pivô ou gotejamento para aplicação desses resíduos e irrigação de salvamento.

26.2.2 Pivô central fixo, rebocável e linear

Os pivôs são amplamente utilizados para produção irrigada em grandes áreas, possuindo três versões: pivô central fixo, pivô central rebocável e pivô linear (ou lateral móvel).

No pivô central fixo e rebocável, uma área circular recebe uma estrutura suspensa (linha lateral) que gira ao redor de uma torre central distribuindo água. Na versão pivô central fixo, a torre central e a linha lateral ficam fixas e dedicadas a uma única área, enquanto na versão rebocável a torre central e a linha lateral podem ser transportadas para outras áreas por trator, ou sistema de auto reboque. A versão pivô linear também é rebocável, mas, ao invés de pivotar ao redor de uma torre central, movimenta-se linear e paralelamente às linhas de plantio, cobrindo áreas retangulares.

A intensidade de aplicação de água do pivô central aumenta no sentido da torre central para a extremidade e, quanto maior o pivô, maior a taxa de aplicação na extremidade final. Por esse motivo, pivôs centrais de grande dimensão ficam limitados a estratégias de menor satisfação da demanda hídrica, já que a taxa de aplicação instantânea não pode ultrapassar a capacidade de infiltração de água no solo, sob pena de causar escoamento superficial e erosão.

Nos últimos anos, o avanço na tecnologia de emissores para pivôs tem permitido que eles operem com baixas pressões, próximas às utilizadas em irrigação localizada. Outro avanço é o incremento do tamanho de gota que, além de reduzir perdas por evaporação e arraste, aumenta o raio de alcance dos emissores e reduz a precipitação instantânea, o que permite projetos com lâminas e/ou linhas laterais maiores, além de maior eficiência energética e uniformidade de aplicação superiores a 90%. Podem ainda ser utilizados para aplicação de vinhaça e água residuária, desde que revestidos com materiais anticorrosivos.

Como podem ser acionados rapidamente em veranicos nos meses da estação chuvosa, o pivô central fixo apresenta vantagem adicional aos sistemas móveis, já que, via de regra, as usinas dispensam a mão-de-obra contratada para irrigação com sistemas móveis logo no início do período chuvoso.

As operações de fertirrigação e quimigação com pivôs são muito eficientes quando o objetivo é a aplicação de produtos não-sistêmicos e que visam o molhamento de toda parte aérea da cultura. Por outro lado, quando o alvo da fertirrigação e quimigação é estritamente o solo e a área radicular, a eficiência de aplicação pode ser reduzida, sobretudo em canaviais adultos, com grande biomassa.

Enquanto o pivô central fixo destina-se com maior frequência ao suprimento de lâminas maiores em uma mesma área, o pivô central rebocável e linear destinam-se, mais comumente, a ampliar a área coberta com um único equipamento, mas em detrimento da redução de lâmina que consegue entregar para cada área. Com lâmina aplicada menor, o potencial produtivo também é inferior. Em relação ao fixo rebocável, o linear permite melhor aproveitamento de área, desde que o formato do terreno o favoreça.

O pivô central, especialmente o fixo, tem como vantagens a simplicidade de operação e manutenção, elevada eficiência de aplicação, baixo consumo de energia e mão-de-obra, possibilidade de automação e flexibilidade no manejo da irrigação, que resultam em baixo custo por milímetro irrigado. Essas vantagens explicam sua rápida adoção para sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar, tendo Carr e Knox (2010) reportado aumento de seu uso, especialmente na África do Sul, Brasil e Austrália. Por outro lado, pivôs apresentam menor aproveitamento de área, maior limitação para lâminas altas com um único equipamento, e uma flexibilidade de manejo, fertirrigação e eficiência de aplicação ligeiramente inferiores ao gotejamento. Com isso, tendem a perder competitividade para o sistema de gotejamento à medida que se adotam estratégias de maior satisfação da demanda hídrica.

Para cobertura de grandes áreas de cana-de-açúcar, pivôs rebocável e linear são mais frequentemente indicados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento inferior a 30% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta inferior a 3 mm dia⁻¹. Já os pivôs centrais fixos costumam ser mais frequentemente indicados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento de 30 a 60% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta entre 3 e 5 mm dia⁻¹.

26.2.3 Gotejamento superficial e subsuperficial

Recentemente, o gotejamento superficial tem sido adotado em sistemas móveis como estratégia de salvamento, sobretudo para plantio com mudas pré-brotadas. Nesse caso, capta-se água diretamente em caminhões-tanque estacionados à beira das áreas que serão irrigadas. Ao finalizar o salvamento da área, recolhem-se os tubogotejadores, linhas de derivação de polietileno, e move-se o sistema para outra área.

Contudo, para o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial é o mais adequado. Quando subsuperficial, o tubo gotejador, ou linha gotejadora, fica enterrado imediatamente abaixo, ou ligeiramente ao lado, da linha de plantio. A água é aplicada diretamente na região radicular, molhando apenas parte do volume do solo, reduzindo as perdas de água por evaporação (OLIVER; SINGELS, 2001).

Em termos de eficiência de aplicação e PA, o gotejamento subsuperficial é considerado o melhor de todos os métodos disponíveis. A água é aplicada em pequenas vazões, baixas pressões e alta frequência, permitindo manter a umidade do solo com pequena variação próxima à capacidade de campo, com pouco riscos de perdas por escoamento superficial ou percolação profunda. Sua boa uniformidade de aplicação também não depende das condições de vento e, por estar enterrado, não impede o trânsito de máquinas durante a irrigação. Destacam-se ainda a economia de fertilizantes, energia e mão-de-obra, capacidade de completa automação e um melhor aproveitamento da área, podendo cobrir praticamente qualquer tamanho, forma e declividade de terreno.

Quanto à fertirrigação e quimigação, apresenta grande eficiência, sobretudo quando se deseja posicionar os insumos exclusivamente no solo e/ou mais próximos ao sistema radicular, sem atingir a parte aérea. Essa é uma grande vantagem para o setor sucroenergético, por exemplo, no combate às pragas de solo. Contudo, quando o alvo da quimigação for a parte aérea da cultura, produtos sistêmicos precisam ser empregados.

Como limitações pode-se relacionar o maior custo de implantação para lâminas baixas e a demanda de uma equipe técnica mais qualificada. Em relação ao pivô, precisa-se dispensar atenção especial à qualidade física, química e biológica da água.

Devido aos pequenos orifícios de saída dos gotejadores e a baixa pressão, os sistemas de irrigação localizada requerem tratamento de água e filtragem eficientes e compatíveis com a qualidade da água disponível. Assim como no pivô, a vida útil do gotejamento subsuperficial e o uso potencial de suas vantagens estão fortemente associados aos cuidados na operação, manutenção e práticas de manejo. Carr e Knox (2010) reportam o uso deste sistema na cana há vários anos, em diversos países, e ressaltam a vantagem relacionada à economia no uso da água e nutrientes. Estes autores ainda reportam que a obtenção dos benefícios característicos do sistema está fortemente relacionada à adequação das práticas de manejo.

Para produção irrigada de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial tem sido instalado, comumente, em profundidade de 0,2 a 0,4 m. Quanto mais profundo for o enterrio das linhas gotejadoras, maior a redução de problemas com vandalismo, dano mecânico e a interferência nas operações agrícolas, além de manter a superfície do solo mais seca, diminuindo a incidência de plantas invasoras e reduzindo significativamente as perdas de água por evaporação.

O enterrio mais profundo é viável desde que a engenharia e manejo da irrigação do projeto sejam feitos de forma rigorosa e de acordo com as características do solo. Caso contrário, podem ocorrer perdas de água e de nutrientes por lixiviação e molhamento insatisfatório das plantas, em especial em solos arenosos.

Para o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial é mais frequentemente recomendado quando a estratégia visa cobrir grandes áreas, com grande aproveitamento de terra, visando máxima verticalização com estratégias de irrigação deficitária, para atendimento superior a 50% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta superior a 5 mm dia⁻¹.

26.3 Demanda hídrica e de irrigação

A demanda hídrica de uma cultura depende substancialmente do clima. Regiões distintas possuem padrões climáticos distintos. Além de apresentar variações dentro do mesmo ano a cada estação, uma determinada região pode apresentar variações climáticas em anos distintos, por conta das oscilações do clima em escala global, com fenômenos como *El Niño*, *La Niña* e outros (SENTELHAS; PEREIRA, 2019). Com as mudanças climáticas globais, essas variações dentro do ano, e a cada ano, também estão cada vez mais intensas e frequentes (SANTOS; SENTELHAS, 2014). Para mensurarmos o potencial climático utilizamos o termo Evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN *et al.*, 1998).

A demanda hídrica da cultura também depende da sua genética e da fase fenológica (idade, ou fase de desenvolvimento e crescimento) que se encontra. Quando se trata da mesma espécie e, em especial quando consideramos a cana-de-açúcar, as diferenças de demanda hídrica entre variedades são inferiores àquelas que dizem respeito às fases fenológicas. Para cana-de-açúcar, dividimos essas fases fenológicas da seguinte forma: (i) germinação (ou brotação, para cana soca); (ii) perfilhamento e desenvolvimento inicial; (iii) desenvolvimento pleno, e (iv) maturação (FRANCISCO *et al.*, 2016; APARECIDO *et al.*, 2020). Um canavial pequeno na Fase I tem demanda hídrica menor do que na Fase II que, por sua vez, tem demanda inferior à Fase III. Quando passa da Fase III para Fase IV, a cana-de-açúcar reduz seu vigor vegetativo e demanda hídrica (SILVA *et al.*, 2013; MARIN *et al.*, 2020).

Para cada fase fenológica de cada cultura utilizamos parâmetros (coeficientes de cultura - K_c) que convertem a demanda potencial do clima (ET_o), em demanda potencial da cultura (evapotranspiração potencial da cultura - ET_c ou ET_p).

A ETC é a máxima demanda que determinada cultura, de determinada idade, segundo seu melhor potencial genético, conseguiria perder por evapotranspiração em dada condição climática se não estivesse sob nenhum tipo de estresse biótico ou abiótico (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN *et al.*, 1998). Podemos associar a ETC ao tamanho, potência, de uma motobomba. Quanto maior essa motobomba, maior será a quantidade de água que poderá ser absorvida pelas raízes da planta e transportada pelos colmos até chegar às folhas, de onde será transpirada para atmosfera. E maior será a quantidade de água que poderá ser evaporada do solo.

Nas regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil, a ETC em um ciclo de 12 meses pode variar, frequentemente, entre 800 e 2000 mm, podendo, eventualmente, atingir valores menores e maiores (CABRAL *et al.*, 2015; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014).

Contudo, a disponibilidade hídrica no solo nem sempre está plena e as plantas reagem a essa deficiência hídrica adotando diversos artifícios para reduzir sua vulnerabilidade, reduzindo sua demanda de água para processos fisiológicos e a perda de água por transpiração. A cana-de-açúcar, mediante condições de deficiência hídrica, fecha estômatos, reduz a multiplicação e expansão celular, enrola e senesce folhas e ativa diversos outros mecanismos para reduzir sua demanda hídrica (SMIT; SINGELS, 2006; PINCELLI; SILVA, 2012; SILVA *et al.*, 2014; VINÍCIUS *et al.*, 2017). Em estágios iniciais de estresse hídrico, a cana-de-açúcar inibe o vigor vegetativo, o crescimento, e acelera mecanismos de sobrevivência, como o armazenamento de açúcar. Em um segundo estágio, de deficiência hídrica mais severa, até mesmo o armazenamento de açúcar é afetado (INMAN-BAMBER, 2002; INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; BUFON *et al.*, 2014; BUFON *et al.*, 2016).

Todos esses processos impactam na intensidade de transpiração e, logo, na evapotranspiração que realmente ocorre. Por isso, para calcular a evapotranspiração real da cultura (ET_r ou ET_a), ou seja, a demanda real da cultura, precisamos converter a ETC em ET_r (ALLEN *et al.*, 1998; CARR; KNOX, 2011). Para conversão da evapotranspiração potencial em evapotranspiração real da cultura, multiplicamos a ETC pelo coeficiente de estresse (K_s), que é função da disponibilidade de água no solo.

No caso da cana-de-açúcar, por ser plantada e colhida ao longo de vários meses do ano, sua demanda hídrica também depende da época de plantio e colheita, ou seja, da interação entre o efeito do clima e a idade da cultura. Um canavial colhido no início de safra passará pelo período de maior ET_o do Cerrado (agosto e setembro) ainda nas Fases I e II, com pequena biomassa, menor demanda e *deficit* hídrico do que um canavial colhido no final de safra, que brota e cresce com abundância no período chuvoso e chega ao início da estação seca do ano seguinte na Fase III, com enorme biomassa para ser sustentada, justamente quando a ET_o é máxima e a oferta de chuva é mínima.

Por essa razão, a demanda hídrica também está associada à época de colheita e produtividade que se almeja alcançar. A ET_r necessária para a mera sobrevivência da cana-de-açúcar é diferente daquela para atingir um nível aceitável, ou um nível elevado, de produtividade (BUFON *et al.*, 2014; BUFON *et al.*, 2016). Quanto mais água passar por dentro da planta e for transpirada, maior a ET_r e maior será a produtividade (INMAN-BAMBER, 1999; CARR; KNOX, 2011; CARVALHO *et al.*, 2019). E quanto maior o percentual da ET_r devido a transpiração, e não a evaporação, maior também será a produtividade.

Uma motobomba enorme (ou ETC enorme) não succiona muita água se estiver sobre um reservatório vazio. Ou seja, a ET_r da cana depende da disponibilidade de

água, da oferta de água de chuva e irrigação e do tamanho do reservatório de água no solo, que é afetado tanto pelas características físicas do solo quanto pela profundidade do sistema radicular da cana.

A Pef (Precipitação efetiva), fração da chuva que se converte em ETr, depende não só do volume, mas também do padrão de distribuição da chuva. No Cerrado, por conta da grande concentração da chuva em poucos meses do ano, geralmente, apenas metade da chuva se torna Pef para cana-de-açúcar. A outra metade escoava para rios e lagos, e infiltra para baixo da zona radicular, não sendo transpirada pela planta.

A conversão de chuva em Pef também depende da capacidade de armazenamento de água do solo (BOSQUILIA *et al.*, 2019). Quanto maior a capacidade de armazenamento de água do solo, maior a Pef. A fração da ETc que não pode ser atendida pela Pef, que não se converte em ETr, é chamada *deficit* hídrico (ALLEN *et al.*, 1998).

Por exemplo, num período de 30 anos em Goianésia, Goiás, na maior parte dos anos, o canal de sequeiro evapotranspirou aproximadamente 650 mm em uma safra de 12 meses. Mas houve anos em que o mesmo canal evapotranspirou 400 mm e outros em que esse valor chegou a 1.400 mm. Essa mesma magnitude de variação é experimentada em regiões produtoras tradicionais de São Paulo, principalmente no Cerrado do estado (CABRAL *et al.*, 2012).

Carr e Knox (2011) apresentaram uma revisão sobre as relações hídricas e as necessidades de irrigação para a cana-de-açúcar, e identificaram demandas variando entre 1.100 a 1.800 mm para as savanas da Austrália e África do Sul, ambiente parecido com nosso Cerrado. Dependendo do local, a ETr diária chegou a atingir picos de 6 a 15 mm.

Na média, precisa-se de 100 mm de ETr (ou 1 milhão de litros por hectare) para que um canal entregue de 5 a 15 toneladas de colmo, o que resultaria em uma PA entre 100 e 150 kg mm⁻¹ a depender da variedade, ambiente de produção e do padrão de manejo agrônomo. Por isso, em um cenário de 650 mm de ETr e que se pretende produzir um TCH maior que a faixa de 65-95 toneladas, precisa-se adicionar água via irrigação, e aproveitar melhor a ETc que a baixa Pef não permitiu converter em ETr.

No Cerrado, onde está a maior parte da cultura de cana brasileira, estratégias de irrigação deficitária para elevar em 40% o TAH e em quase 100% a longevidade do canal podem resultar na aplicação de 300 a até mais de 1.000 mm em 12 meses de cultivo.

26.4 Manejo da irrigação

Como salienta Bernardo *et al.* (2019), o sistema irrigado é dinâmico e as etapas de estudo de viabilidade, projeto hidráulico e implantação não podem ser compreendidas desassociadas da operação e manejo do sistema irrigado. O manejo da irrigação deve aplicar as melhores estratégias de distribuição da água ao longo do ciclo, considerando tanto aspectos inerentes a cada projeto (lâmina de projeto, metas de produtividade, aspectos sociais e mão-de-obra, estratégias nutricionais e fitossanitárias, manutenção ou aprimoramento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manutenção e vida útil dos equipamentos) quanto aspectos comuns a todos os sistemas de irrigação, ou seja, quando e quanto aplicar por evento de irrigação, uniformidade de aplicação e eficiência da irrigação.

Junto com as falhas de ajuste nas práticas agrônômicas do sistema de sequeiro para o irrigado, as falhas no manejo de irrigação são responsáveis pela grande maioria

dos insucessos de investimentos em sistema irrigado de produção. E essas falhas nada têm a ver com o potencial do sistema irrigado de produção, mas com a deficiência de capacitação técnica e de qualidade gerencial para aplicar essa tecnologia.

26.4.1 Métodos de manejo da irrigação

A aplicação eficiente de qualquer método de manejo de irrigação requer conhecimento das inter-relações entre solo, água, planta e atmosfera. Dentre os métodos mais utilizados para o manejo da irrigação destacam-se o método via solo, e o método via clima.

26.4.1.1 Manejo via solo

No manejo via solo, estipula-se uma faixa adequada de umidade ou tensão de água no solo e instala-se equipamentos de medição distribuídos espacialmente e em profundidades distintas do solo da área irrigada. Toda vez que a umidade do solo declinar para valores inferiores aos ideais, ou que a tensão de retenção da água no solo subir para valores superiores aos ideais, calcula-se e aplica-se uma lâmina de irrigação que eleve a umidade, ou diminua a tensão, para os níveis desejados.

Existem medidores de leitura manual e, mais recentemente, uma infinidade de opções de medidores automatizados, sobretudo sensores de umidade, que coletam e enviam remotamente a informação.

O manejo eficiente da irrigação via solo, por depender exclusivamente dessa camada de informação, requer excelente acurácia da informação de umidade de cada sensor, e ainda de uma quantidade suficiente de pontos de monitoramento ao redor da lavoura para absorver as discrepâncias intrínsecas à variabilidade espacial do solo e da cultura.

Dos inúmeros sensores eletrométricos disponíveis comercialmente, poucos possuem precisão e acurácia adequadas para o manejo de irrigação em solos tropicais. Mas, por conta do custo, acabam sendo empregados estritamente na pesquisa. Os sensores eletrométricos de menor custo, apesar da simplicidade de uso, não entregam exatidão inferior a 3,5% em umidade volumétrica para nossos solos tropicais (SCHWARTZ; EVETT, 2016; LEÃO *et al.*, 2020; SCHWARTZ *et al.*, 2020). Considerando que, em média, nossos solos armazenam cerca de 1 mm de água para cada centímetro de solo, ou seja, 10% em volume, o nível de precisão desses medidores resulta em erro de até 35% da água disponível para cultura. Quando utilizados sensores com exatidão inferior a 1,5% de umidade volumétrica, o manejo via solo é uma alternativa viável.

Contudo, não recomendamos que o manejo via solo seja a primeira opção para manejo de irrigação em grandes áreas sob sistema irrigado de cana-de-açúcar. Um manejo eficiente com esse método demandaria uma enorme quantidade de sensores de custo elevado, além da dificuldade de instalação, automação, operacionalização e manutenção desses sensores.

26.4.1.2 Manejo via clima

Para o manejo via clima, define-se um volume de controle do solo a partir do qual todas as entradas e saídas de água são estimadas - balanço hídrico. Esse volume de controle do balanço hídrico é a Capacidade Total de Armazenamento de Água do Solo (CTA).

Capacidade total de armazenamento: a CTA é definida tanto pela CAD/ z quanto pela profundidade do sistema radicular (z). A CAD/ z depende intrinsecamente da textura e estrutura do solo, é dada em mm cm^{-1} , e informa quantos milímetros de água por centímetro de profundidade um solo é capaz de reter, sem que ela se perca por percolação profunda (escoamento). Já a profundidade do sistema radicular para manejo de sistemas irrigados, além das características da planta, também envolve decidir qual profundidade ou, qual volume de controle, se deseja adotar para manejar a irrigação.

Uma estratégia é considerar a profundidade radicular efetiva (z), que é aquela em que se encontram 80-90% de todo o volume radicular da planta (CUNHA *et al.*, 2010; SMIT *et al.*, 2000). A z é sempre menor que a profundidade radicular máxima de uma cultura. A distribuição e profundidade radicular é definida pela presença de barreiras químicas e físicas do solo, pela genética da cultura e pela oscilação da presença de água e nutrientes ao longo do ciclo. A planta ajusta a densidade de raízes, expandindo ou contraindo, para encontrar água e nutrientes disponíveis para seu crescimento.

Por essa razão, em sistemas irrigados, a profundidade de manejo não precisa ser, necessariamente, um valor comum de z dessa cultura no sequeiro. Como controla-se a irrigação e a fertirrigação, pode-se induzir a planta a concentrar raízes na região do solo que se deseja definir como volume de controle.

Em ambientes mais áridos, com pouca disponibilidade de chuva, permite-se confinar o sistema radicular em um percentual menor do volume total disponível para a planta. Contudo, no Cerrado, apesar dos 5-6 meses de pouca ou nenhuma precipitação, temos 6-7 meses com boa precipitação. Nesse caso, confinar demasiadamente o sistema radicular implicaria em não ter raízes disponíveis para explorar água e nutrientes fora desse pequeno volume no período chuvoso.

Um volume de raízes excessivo implica em gasto de carboidratos que poderiam estar sendo utilizados para ganho de produtividade de colmos e açúcar. Por outro lado, quanto menor o volume de controle maior a suscetibilidade da cultura para o estresse hídrico caso haja falhas no sistema de irrigação, além de reduzir o uso dos nutrientes e água da chuva nas regiões do solo onde não há densidade radicular suficiente.

Balanco hídrico: no manejo via clima estima-se a umidade do solo diariamente através do balanço hídrico, que é a estimativa do saldo remanescente de água no solo após considerar as entradas (chuva e irrigação) e saídas (ETr), escoamento superficial e lateral, e percolação profunda) de água no volume de controle (CTA).

Para estimativa da ETr, estima-se primeiro a ETo com dados de uma estação meteorológica nas proximidades da área, medindo as variáveis temperatura, radiação, umidade relativa e velocidade do vento para estimar a demanda climática. Na mesma estação, ou em pontos adicionais, também é mensurada a precipitação. A partir dos valores de ETo e do coeficiente de cultura (K_c) referentes à fase fenológica que está a cultura, estima-se a ETc. Com a ETc e valores de coeficiente de estresse (K_s), estima-se a fração da ETc que se converte em ETr.

Quando irrigar: o momento de irrigação é definido através do nível de umidade crítico, chamado de Fator de Disponibilidade Hídrica (f). O f representa o nível de depleção da umidade do solo permitido pela estratégia de irrigação, variando de 0 a 1. Um f igual a 0,1 significa que o manejo será conduzido de tal forma que, quando for consumido 10% da CTA, um evento de irrigação será realizado. Um f igual a 0,5 implica em eventos de irrigação toda vez que 50% da CTA for consumida. A decisão do f para

cada fase fenológica tem a ver com a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico nessa fase. Quanto mais sensível, menor o valor de **f** que se utiliza para disparar as irrigações.

Quanto irrigar: o volume de irrigação necessário é calculado pela diferença entre a umidade atual do solo e a umidade para a qual se deseja elevar.

Mais detalhes sobre procedimentos de cálculo de evapotranspiração e balanço hídrico de culturas podem ser consultados em Doorenbos e Kassam (1979) e Allen *et al.* (1998).

26.4.1.3 Método combinado de manejo

O método via clima é mais adequado para aplicação em grandes áreas, sem a necessidade de uma enorme quantidade de sensores espalhados pelo campo. Por outro lado, por se basear estritamente em estimativas, podem resultar em erros que só seriam identificados quando algum dano ao desenvolvimento da cultura já tivesse ocorrido.

Por essa razão, recomenda-se o **método combinado de manejo** para sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar em grandes áreas. Esse método conjuga estratégias do método via solo e via clima, e ainda adiciona uma terceira camada, o sensoriamento da planta.

No método combinado, utiliza-se como referência principal o método via clima. Tal qual descrito acima, sem modificações. E adicionamos ao sistema de tomada de decisão mais duas camadas de informação e aferição.

A primeira camada é o monitoramento da umidade do solo. Mas diferentemente do método de manejo via solo, não distribuímos muitos sensores ao redor da área, nem nas mesmas profundidades, e nem precisamos de grande exatidão da aferição umidade do solo. Coloca-se apenas alguns sensores eletrométricos em profundidades estratégicas para aferir o método via clima. Um primeiro sensor é localizado no limite inferior da zona de controle e um segundo sensor de 10 a 15 cm abaixo do primeiro sensor. Ou seja, 10 a 15cm abaixo do limite inferior da zona de controle do manejo. Se o primeiro sensor não detectar a chegada de água após o evento de irrigação, temos um alerta de subestimativa da demanda de irrigação. Se, por outro lado, a chegada de água é detectada no primeiro sensor, mas também no segundo sensor, temos um alerta de superestimativa da demanda hídrica. Pelo fato de demandar apenas a detecção da presença de água, e não sua quantidade com exatidão, sensores eletrométricos de menor custo atendem satisfatoriamente ao objetivo de adição de uma camada de monitoramento no método combinado de manejo. A segunda camada é o monitoramento da temperatura do dossel da cultura. Utilizamos parâmetros conhecidos de temperatura do dossel da cana-de-açúcar sob condições ótimas de manejo de irrigação e, através de imagens tomadas por drones e satélites, aferimos se o manejo de irrigação está propiciando pleno desenvolvimento para o canavial.

26.5 Parâmetros para estimativa de demanda hídrica

26.5.1 Capacidade de água disponível

Recomenda-se amostragens a campo para determinação da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade. Para determinação da CC, recomenda-se amostras indeformadas e o método da Mesa de Tensão, ou método da bacia de saturação à campo. Essa mesma amostra indeformada por ser utilizada para determinação da densidade do solo. Para o PMP, recomenda-se o uso de amostras

deformadas com método de Richards ou semelhante. A mesma amostragem deformada para PMP pode ser utilizada para análise de textura.

Na ausência de informações tomadas diretamente a campo, a título provisório, sugere-se considerar os valores de CAD estimados por Prado (2018).

26.5.2 Profundidade radicular e profundidade de controle

Sem barreiras físicas ou químicas, o sistema radicular da cana-de-açúcar pode chegar até 6m de profundidade, mas a maior densidade fica concentrada na faixa de 1,5 a 2 m (SMITH *et al.*, 2005; ARAÚJO, 2018).

Nos solos tropicais, em razão da deficiência de cálcio e fósforo em profundidade, a maior densidade de raízes na cana-de-açúcar encontra-se restrita à profundidade do preparo e correção do solo.

Na Tabela 1 apresenta-se o padrão de distribuição de raízes de cana-de-açúcar disponíveis na literatura para diversas localidades e variedades, sob diferentes cenários de oferta hídrica e em ciclo de cana planta e cana soca.

Tabela 1. Distribuição radicular em cana-de-açúcar por camada de solo (cm) e sistema de irrigação.

Referência	Sistema de Irrigação	Ciclo	Proporção de raízes por camada de solo (%)				
			0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Laclau (2005)	Aspersão	Planta	51,6	36,7	11,1	0,4	-
Farias <i>et al.</i> (2008)	Pivô Central	Planta	55,6	20,1	12,0	8,9	3,2
Ohashi <i>et al.</i> (2015)	Gotejamento Subsuperficial	Soca	53,6	29,5	12,9	4,0	-
Ohashi <i>et al.</i> (2015)	Gotejamento Subsuperficial	Soca	53,3	31,2	10,8	4,7	-
Clemente <i>et al.</i> (2017)	Aspersão	Planta	55,5	32,3	12,7	-	-

26.5.3 Coeficiente de cultura

Na Figura 1, apresenta-se uma análise de valores de Kc por fase fenológica da cana-de-açúcar, utilizando-se dados de 34 publicações que estimaram ou determinaram o Kc por diversos métodos, tanto para lavouras no Brasil (10 publicações) quando em outros lugares do mundo (24 publicações), entre 1967 e 2020. Essas diferenças podem estar associadas aos fatores que afetam as taxas de transpiração e evaporação, como diferenças varietais e, principalmente, práticas agrônomicas e sistemas de produção. Por exemplo, diferentes espaçamentos entre fileiras de cultura, arquitetura de dossel, velocidade de crescimento da planta, sombreamento do solo e padrões de molhamento do solo pela irrigação podem afetar tanto a transpiração quanto a evaporação.

O método sugerido por Allen *et al.* (1998) para cálculo da evapotranspiração da cultura pressupõe que as diferenças regionais e metodológicas de estimativas de ETc podem ser reduzidas, deixando para a ETo a responsabilidade de capturar majoritariamente os efeitos do clima e para o Kc a função de transformar o potencial do clima em potencial da cultura. Para determinação dos valores de Kc, submete-se a cultura à condições ideais, onde nenhuma restrição biótica ou abiótica limite seu desenvolvimento e transpiração. No entanto, garantir essa ausência absoluta de estresse biótico e abiótico pode ser um grande desafio, sobretudo para uma cultura

como a cana-de-açúcar, em que o sistema irrigado de produção não está completamente dominado.

Outro aspecto importante é a evidência de que, em vários dos estudos utilizados, condições hídricas e nutricionais ótimas, sobretudo no Brasil, não foram garantidas. Por isso, possivelmente, dificuldades experimentais conduzam mais frequentemente à subestimativa do que à superestimativa dos valores de K_c no Brasil.

Adicionalmente, valores de K_c são influenciados pela resistência aerodinâmica ou outros mecanismos que inibem a transpiração da cultura sob condições de ET_0 elevadas, sobretudo quando superior a 5 mm dia^{-1} . Nesses casos, Allen *et al.* (1998) e Marin *et al.* (2020) sugerem equações para correção dos valores de K_c .

Julgamos que o aperfeiçoamento de valores de K_c específicos para diferentes variedades e espaçamentos entre fileiras utilizados no Brasil não são, no momento, prioritários ante ao bom domínio dos ajustes agrônômicos para um sistema irrigado de produção, e do manejo de irrigação utilizando parâmetros de K_c já disponíveis na literatura.

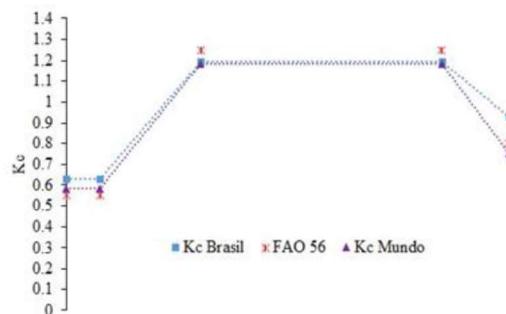


Figura 1. Valores médios de coeficiente de cultura (K_c) por fase fenológica da cana-de-açúcar, estimados a partir de 10 estudos no Brasil e 24 ao redor do mundo, e valores recomendados por Allen *et al.* (1998) no Boletim FAO 56.

26.5.4 Fator de disponibilidade hídrica

O fator de disponibilidade hídrica é o limite de depleção da água do solo a partir do qual um evento de irrigação será realizado. A sua escolha depende não só da sensibilidade da cultura ao estresse hídrico, mas também da estratégia de manejo.

Partindo de um solo na capacidade de campo, ou seja, com 100% da CTA disponível, a cana-de-açúcar absorverá água pelo sistema radicular e não sofrerá nenhum impacto na sua taxa de transpiração e vigor vegetativo até um determinado momento, que chamaremos de **1º Limite de Depleção**. A partir desse ponto, a planta começa a encontrar mais resistência para absorver água do solo, resultando em desaceleração da expansão e multiplicação celular, ou seja, do crescimento (INMAN-BAMBER, 2002), até chegar no **2º Limite de Depleção**. A partir daí, a planta continua extraindo água do solo, mas, a dificuldade de extração aumenta a tal ponto que, além de interromper completamente seu crescimento vegetativo, reduz a taxa de concentração de sacarose (INMAN-BAMBER, 2004; MACHADO *et al.*, 2009), até atingir um **3º Limite de Depleção**. Após esse 3º Limite, além da paralisação completa do crescimento vegetativo, a planta também cessa totalmente a concentração de açúcar nos colmos. Consequentemente, embora haja uma quantidade mínima de água disponível no solo, ela está retida em tensões tão elevadas que a planta não mais consegue absorvê-la. Desse momento em diante, com estômatos praticamente todos fechados e taxa de transpiração próxima a zero, a planta não produz mais energia suficiente para atender sua demanda. Então, para sobreviver e continuar respirando,

sobretudo em noites quentes, precisa utilizar das reservas de energia (açúcar) que havia acumulado em seus colmos (VAZQUEZ *et al.*, 1989). É o que chamamos de processo de inversão de sacarose e isoporização - perda de peso e qualidade do colmo (ARALDI *et al.*, 2010).

Na Tabela 2 são listados alguns valores de **f** para esses estágios de estresse hídrico, e que podem ser utilizados para definir a faixa de água disponível que se pretende utilizar na estratégia de manejo da irrigação. Os valores de **f** listados são, em sua maioria, determinados para condições de ETC média de aproximadamente 5 mm dia⁻¹. Para valores maiores e menores de ETC, Allen *et al.* (1998) sugere uma equação para correção do valor de *f*.

Tabela 2. Fator de disponibilidade hídrica (f) para cana-de-açúcar.

Fator de Disponibilidade Hídrica - f				
Faixa de Depleção da CTA	< 1º Limite	1º a 2º Limite	2 a 3º Limite	> 3º Limite
Impacto no desenvolvimento vegetativo	Máximo	Reduzido	Interrompido	Interrompido
Impacto no acúmulo de açúcar nos colmos	Máximo	Máximo	Reduzido	Interrompido
Doorenbos e Kassam (1979)	0,65	0,65	0,65	0,65
Allen <i>et al.</i> (1998)	0,65	0,65	0,65	0,65
Inmam-Bamber (2002)	< 0,26	0,26 - 0,57	0,57 - 0,65	> 0,65
Singels <i>et al.</i> (2010)	< 0,126	0,126 - 0,27	0,27 - 0,81	> 0,81
Singels e Laan (2012)	< 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7	> 0,7
Raes <i>et al.</i> (2018)	< 0,2	0,2 - 0,6	0,6 - 0,85	> 0,85
Santos <i>et al.</i> (2019)	< 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,8	> 0,85

26.5.5 Coeficiente de estresse hídrico

Os mecanismos morfológicos e fisiológicos utilizados pela cana-de-açúcar para se adaptar a condições de deficiência hídrica impactam na fração da ETC que se converte em ETr (HSIAO; ACEVEDO, 1974; INMAN-BAMBER *et al.*, 2012). O coeficiente de estresse hídrico (Ks) é utilizado para a estimativa dessa redução da ETr em relação à ETC. Se o valor de Ks for igual a 1, significa que toda a disponibilidade de água no solo permite que toda ETC seja convertida em ETr. Um Ks igual a zero implica que a disponibilidade de água no solo para planta está tão baixa que nada da ETC se converte em ETr. Na Tabela 3, são apresentados modelos de cálculo de Ks.

Tabela 3. Modelos de cálculo do coeficiente de estresse hídrico, K_s .

Coeficiente de Estresse Hídrico - K_s		
Referência	Equação	Descrição
Allen <i>et al.</i> (1998)	$K_s = \frac{CAD - D_r}{(1 - p)CAD}$	CAD = total de água disponível na zona radicular [mm]; D_r = depleção hídrica na zona radicular [mm]; p = fração da CAD que a cana-de-açúcar pode extrair antes do início do estresse hídrico.
Singels <i>et al.</i> (1998)	$K_s = F_s(1 - F_i)$	F_s = índice de umidade da superfície do solo; F_i = fração da cobertura do dossel.
Bernardo <i>et al.</i> (2019)	$K_s = \frac{\ln(LAA + 1)}{\ln(CRA + 1)}$	LAA = lâmina atual de água no solo [mm]; CRA = capacidade real de água no solo [mm].
Steduto <i>et al.</i> (2012)	$K_s = (0,28 - 0,18G - 0,03ET_0 + \left(\frac{3,8F(1 - F)}{ET_0}\right)(1 - wz))$	G = fração do solo coberta pelo dossel; ET_0 = evapotranspiração de referência; F = frequência mensal de dias chuvosos; wz = fração da superfície úmida do solo.

26.6 Estratégias de manejo

Para produção irrigada de cana-de-açúcar recomendamos a estratégia de irrigação com **deficit hídrico controlado**, também chamada de **irrigação deficitária**. Essa estratégia de otimização aplica irrigação durante as fases fenológicas de forma dinâmica, provendo maior atendimento da demanda nas fases em que a planta é mais sensível ao estresse hídrico. Fora desses períodos, a irrigação é total ou parcialmente suprimida, seja em função da maior tolerância da cultura ao estresse hídrico, seja porque a chuva já provê água suficiente para otimizar a produção. Essa prática, além de otimizar o TAH, também aumenta a PA e a sustentabilidade ambiental da produção irrigada frente à produção de sequeiro (ZHANG; OWEIS, 1999; FERERES; SORIANO, 2007).

Os limites físicos e fisiológicos que determinam o valor de **f** para cada fase fenológica não precisam ser os únicos considerados na definição do valor que será adotado, podendo a estratégia de manejo adotar valores ligeiramente maiores ou menores, seja por questões estratégicas ou econômicas. Por exemplo, o aprofundamento radicular de gramíneas, como a cana-de-açúcar, pode ser induzido através da prática de manejo criterioso de irrigação deficitária, permitindo um incremento gradativo do limite de depleção (ALLEN *et al.*, 1998). Se bem conduzida, essa prática pode aumentar a eficiência de uso de água e nutrientes do perfil do solo, aumentar a P_{ef} , e reduzir a demanda de irrigação.

Dentre as formas de aplicar o **deficit hídrico controlado** no manejo da irrigação, duas se destacam: (i) aumentar o valor de f adotado, permitindo um maior nível de depleção de água no solo antes de voltar a irrigar; e (ii) repor apenas parcialmente a irrigação total necessária (ITN - lâmina necessária para elevar a umidade atual até a capacidade de campo) toda vez que a umidade atingir o ponto **f**. A aplicação simultânea das duas estratégias também pode ser utilizada.

Se a estratégia de irrigação por **deficit hídrico controlado** for considerada desde a concepção do projeto de irrigação, a lâmina máxima diária que pode ser aplicada (lâmina de projeto) pode ser dimensionada de tal forma que atenda integralmente à demanda hídrica nas fases iniciais, mais críticas, e apenas uma fração

da demanda nas fases de maior requerimento, onde a cana-de-açúcar também é mais tolerante ao *deficit* hídrico. Essa estratégia otimiza a lâmina de projeto e, logo, o investimento na infraestrutura de irrigação.

Uma forma de dimensionar esse nível de *deficit* hídrico aplicado durante o ciclo da cultura é o % de redução da ETc. Ou seja, o percentual da ETc de todo o ciclo que, de modo controlado e proposital, não se transformará em ETr.

26.7 Estratégia de maturação (*drying-off*)

Cada variedade tem seu potencial genético para acúmulo de açúcar e seu padrão de curva de maturação (PEREIRA *et al.*, 2017). A fisiologia da maturação é um sistema belíssimo e complexo que também é influenciado por diversos outros processos (MARIN; NASSIF, 2013). Praticamente tudo que sinaliza para a planta que o seu ciclo de vida pode estar chegando ao fim ou que seu futuro está em perigo, engatilha processos fisiológicos que aceleram a maturação e o armazenamento de açúcar nos colmos. Declínio de temperatura e *deficit* hídrico são dois dos fatores que aceleram a curva de maturação (CASAROLI *et al.*, 2019).

Com temperatura favorável ao seu crescimento, se não houver restrição hídrica, a cultura continuará dedicando a maior parte de sua energia para produzir mais folhas e crescer. Isso ocorre tanto para cana de sequeiro como cana irrigada. Por essa razão, por exemplo, eventos de chuva fazem os valores de ATR (açúcar total recuperável, kg t⁻¹) caírem em canavial que está prestes a ser colhido (OLIVEIRA *et al.*, 2011). Por outro lado, temperatura excessivamente baixa e estresse hídrico por períodos muito prolongados fazem a cultura ultrapassar o ponto de maturação ótimo. Os processos fisiológicos da cana em sistema de sequeiro e irrigado são os mesmos, o que muda são o formato de suas curvas de maturação (CASAROLI *et al.*, 2019), da mesma forma como a curva de maturação da cana de sequeiro em um solo que armazena mais água é mais lenta do que a curva num solo arenoso (MAULE *et al.*, 2001). Ou seja, é necessário aprender o comportamento da curva de maturação de um canavial irrigado e, assim, como se faz em áreas de sequeiro, utilizar estratégias de manejo para otimizar a maturação e o momento de colheita. Chama-se *drying-off* (INMAM-BAMBER; SMITH, 2005) a estratégia de redução controlada da irrigação nos dias que antecedem a colheita, que resulta em maior *deficit* hídrico, interrompe o vigor vegetativo e a acelera a concentração de açúcar nos colmos.

Se o manejo da oferta de nutrientes não estiver compatível com o objetivo de interromper o crescimento vegetativo e otimizar a maturação, a estratégia de *drying-off* funcionará, mas de forma limitada.

Se o *drying-off* aplicado for demasiadamente moderado, o TCH será maximizado, mas não o ATR. Por outro lado, se for demasiadamente agressivo, o ATR será maximizado, mas o TCH pode ser reduzido além do adequado. Na verdade, sob condições de estresse hídrico excessivo, perde-se TCH e perde-se ATR. Por isso, o objetivo do *drying-off* não é maximizar nem o TCH, nem o ATR, mas o TAH.

O ganho de TAH com a aplicação da estratégia de *drying-off* já foi observado em várias áreas de produção (ROBERTSON; DONALDSON, 1998; INMAM-BAMBER; SMITH, 2005; OLIVIER *et al.*, 2006; BARBOSA *et al.*, 2012; BARBOSA *et al.*, 2013; HAGOS *et al.*, 2014; PIRES *et al.*, 2014; SILVA, 2014). Há relatos de até 18% de TAH em vários experimentos. Inman-Bamber (2004) reporta *drying-off* otimizado quando resulta na perda de 3 a 4 folhas por colmo. Robertson e Donaldson (1998), analisando resultados na África do Sul, identificaram ganhos médios de TAH de 8%, chegando até 15%.

Diversos autores tentam correlacionar a intensidade adequada do *drying-off* a um determinado número de dias de interrupção da irrigação antes da colheita. Hagos *et al.* (2014), na Etiópia, identificaram que 65 dias de *drying-off* favoreceu a variedade estudada. Em Guaíra, SP, Barbosa *et al.* (2012), Barbosa *et al.* (2013), e Pires *et al.* (2014) aplicaram *drying-off* de 45 a 75 dias para otimizar o TAH para variedade RB855536. Vieira *et al.* (2013), estudando a variedade RB86-7515 em Jaíba, MG, otimizaram o TAH com *drying-off* aplicado 7 dias antes do corte. Araújo *et al.* (2016) otimizaram o TAH para variedade CTC 4 em Santo Antônio de Goiás, GO, aplicando *drying-off* 30 dias antes da colheita. E Olivier e Singels (2015) otimizaram o TAH na África do Sul com *drying-off* de 20 a 40 dias. Comumente, no Brasil, produtores aplicam *drying-off* de 30 dias antes da colheita, independentemente da variedade, do padrão nutricional da lavoura, do uso de maturadores, do nível de água disponível no início do *drying-off*, do clima (ETo e temperatura) na fase de maturação, da profundidade radicular e da capacidade de retenção de água do solo. No entanto, o número de dias não é o método mais adequado para determinar a intensidade ótima do *drying-off*, justo por que não considera todas as variáveis que influenciam esse processo de maturação.

Inman-Bamber e Jager (1986) indicaram que a maturação ocorre quando o potencial de água na folha encontra-se entre -0,2 e -1,2 MPa. Robertson e Donaldson (1998) demonstraram que o TAH é maximizado quando o *drying-off* resulta em decréscimo inferior a 10% da matéria seca do colmo. Além desse limite, o TAH cai linearmente. Robertson *et al.* (1999) reportaram melhores resultados de TAH quando o *drying-off* aplicado produziu redução de 4 a 8% da matéria seca. Donaldson e Benzuidenhout (2000) afirmam que, na África do Sul, uma prática comum dos produtores era aplicar um *drying-off* equivalente a duas vezes a CTA. Mas, em seu trabalho, obtiveram otimização do *drying-off* quase sempre com múltiplos bem abaixo de 2 vezes a CTA. Para solos e alta retenção, os múltiplos se aproximaram de 1 e, nos solos de menor retenção, múltiplos de até 1,8. Singels *et al.* (2000) verificaram que o ATR foi favorecido quando o *drying-off* imprimiu níveis de disponibilidade relativa de água no solo abaixo de 55%. Este tipo de estratégia de mensuração da intensidade do *drying-off* - observação da planta e/ou do solo, pode auxiliar a tomada de decisão mais assertiva para otimização do TAH.

Vale ressaltar que a aplicação precisa da estratégia de *drying-off* também depende de que o clima após a interrupção da irrigação se comporte próximo da condição normal prevista. Eventos não esperados de chuva prejudicam a precisão da estratégia, sobretudo quando se pretende aplicá-la para colher o canavial no início ou final de safra. No meio da safra, quando há menor probabilidade de chuva nos dois meses que antecedem a colheita, há maior chance de executar com perfeição o *drying-off*.

No Cerrado, o período de *drying-off* pode oscilar entre 10 e 90 dias. Para uma variedade de curva de maturação menos acentuada, sob solo de elevada CTA, colhido no início da safra (temperaturas mais amenas e mais próximo ao final do período chuvoso), será necessário um maior número de dias de *drying-off* do que um canavial com variedade de curva de maturação mais acentuada, sob solo com menor CTA, colhido no final de agosto, quando a temperatura do ar é mais elevada e o nível de água disponível no solo já está muito reduzido.

Uma vantagem adicional do *drying-off* é a criação de melhores condições para o tráfego de máquinas na colheita, sem os efeitos de compactação e afundamento de entrelinha.

26.8 Recomendações para estimar a demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado

Nos últimos 10 anos, a equipe de pesquisa em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar da Embrapa Cerrados tem conduzido dezenas de experimentos dentro de usinas no Cerrado. Em todos esses experimentos, todas as práticas agronômicas para alto desempenho e operações são realizadas utilizando os mesmos insumos e maquinários empregados nas áreas comerciais dessas usinas. Esse aspecto é fundamental para aumentar a probabilidade de resultados da pesquisa serem replicáveis quando aplicados em área comercial. Além das dezenas de experimentos, a equipe também tem orientado e acompanhado o aperfeiçoamento da tecnologia e o manejo da irrigação em milhares de hectares sob esse sistema. Por isso, baseados na combinação do conhecimento científico e empírico acumulados pela equipe, indicamos na Tabela 4 um conjunto de parâmetros que tem proporcionado, até o momento, a melhor acurácia para estimativa de ETr e manejo de irrigação para produção de cana-de-açúcar no Cerrado. Os resultados de produtividade alcançados com esse conjunto de parâmetros serão descritos adiante no texto.

O uso da zona radicular indicada na Tabela 4 pressupõe a eliminação de barreiras químicas e físicas para o pleno desenvolvimento de raízes nessas profundidades, sobretudo quanto aos níveis de cálcio, magnésio e fósforo. Na fase de germinação, ajustes na profundidade de controle podem ser necessários em função do método de plantio (propagação vegetativa ou MPB) e em função da profundidade de sulcação. Recomenda-se um volume de controle inicial pelo menos 0,2 m abaixo da profundidade de plantio.

A partir da 1ª soca, e com exceção da fase de maturação, caso haja qualquer problema que implique no esgotamento total da camada de manejo, consideramos uma disponibilidade adicional de água equivalente a 30% da CTA. Em suma, essa estratégia considera que, além da zona escolhida para manejo da irrigação, existem algumas poucas raízes cordão que descem a camadas mais profundas do solo e que, em condições de estresse hídrico severo, são responsáveis pela absorção da maior quantidade de água utilizada pela planta (SMITH *et al.*, 2005; ARAÚJO, 2018). Na prática cotidiana do manejo de irrigação, trincheiras devem ser abertas eventualmente para verificação da distribuição radicular no perfil do solo.

Adotando práticas nutricionais de pré-maturação e o cálculo do *drying-off* equivalente ao consumo da CTA têm resultado, frequentemente, em valores de ATR superiores às áreas de sequeiro, comprovando o potencial do sistema irrigado de extrair melhor o potencial genético da cana. Com isso, além dos ganhos em TCH, um canavial irrigado e com manejo adequado de *drying-off* também pode entregar ganhos expressivos de ATR e, conseqüentemente, TAH.

Tabela 4. Parâmetros recomendados para estimativa de ETr e manejo de irrigação de cana-de-açúcar no Cerrado.

Fase Fenológica	I	II	III	IV
	Até 25% de cobertura do solo	25 a 100% de cobertura do solo	100% de cobertura do solo	100% de cobertura do solo
Germinação ou Brotação	Perfilhamento e Desenvolvimento Inicial	Desenvolvimento Pleno	Maturação (Drying-off)	
Coefficiente de Cultura - Kc				
Cana-planta e cana-soca	0,55	0,9	1,25	0,8
Fator de Disponibilidade Hídrica - f				
Cana-planta e Cana-soca	0,3	0,3	0,5	0,9
Modelo de cálculo de coeficiente de estresse - Ks				
Até ponto f	Ks = 1	Logarítmico, Bernardo <i>et al.</i> (2019)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)
Após ponto f	Logarítmico, Bernardo <i>et al.</i> (2019)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)
Reposição da Irrigação Total Necessária (ITN), em %				
Cana-planta e Cana-soca	100	100	100 ¹	5
Profundidade da zona radicular de controle - z (m)²				
Cana Planta ³	0,3	0,4	0,5	1
1ª Soca	0,35	0,45	0,55	1,1
2ª Soca em diante	0,4	0,5	0,6	1,2

¹ Na Fase III, utiliza-se aplica-se 100% da ITN enquanto a demanda não supera a lâmina de projeto. Contudo, como recomenda-se estratégias de irrigação deficitária e lâminas de projeto para satisfação de 75% da ITN máxima simulada pelas normais climatológicas, em boa parte da Fase III o sistema não consegue satisfazer a demanda, gerando uma redução proposital da fração de ETC que se converte em ETR.

² O uso da zona radicular indicada na Tabela 4 pressupõe a eliminação de barreiras químicas e físicas para o pleno desenvolvimento de raízes nessas profundidades, sobretudo quanto aos níveis de cálcio, magnésio e fósforo.

³ Na fase de germinação, ajustes da profundidade de controle podem ser necessários em função do método de plantio (propagação vegetativa ou MPB) e em função da profundidade de sulcação. Recomenda-se um volume de controle inicial pelo menos 0,2m abaixo da profundidade de plantio.

As melhores respostas da cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção têm ocorrido quando aproximadamente 75% da ETC é convertida em ETr ao longo do ciclo. Ou seja, quando, ao final do ciclo, a ETr acumulada representa uma redução de aproximadamente 25% da ETC. Variedades menos responsivas à irrigação, e por isso não recomendadas, normalmente, atingem máxima produtividade em patamares inferiores a 75% de satisfação da ETC. Para se alcançar a redução recomendada de 25% ETC ao final do ciclo, um percentual maior que 75% da ETC é satisfeito nas fases fenológicas iniciais, e um percentual menor que 75% da ETC é satisfeito na fase fenológica de desenvolvimento pleno. Os parâmetros apontados na Tabela 4 devem propiciar o nível recomendado de irrigação deficitária para a maior parte da região produtora de cana-de-açúcar no Cerrado, sob condições climatológicas normais, e adotando o manejo agrônômico sugerido. Para condições diferentes das normais climatológicas, ou manejo agrônômico muito distinto do recomendado, ou em regiões

de transição do bioma Cerrado para outros biomas, os parâmetros precisam ser ajustados.

A deficiência hídrica na fase de maturação não é considerada no cômputo do alvo de redução da ETc, dado que, nessa fase a deficiência hídrica é induzida e benéfica.

26.9 Resposta produtiva da cana-de-açúcar ao sistema irrigado

É farta a literatura que demonstra a resposta produtiva da cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção. Na Figura 2, apresenta-se o resultado da compilação de dados oriundos de 42 publicações, sendo 16 relativas à experimentação em outros países, como África do Sul, Austrália, Suazilândia, Índia, China, Estados Unidos e Irã, e outras 26 oriundas de experimentação no Brasil. O experimento mais antigo da base de dados é de 1971 e, o mais recente, 2020. Do total de publicações, 17 referem-se a experimentações anteriores ao ano 2000, e 25 posteriores a esse ano. Resultados de cana-planta e cana-soca não foram separados nesta análise.

Na Figura 3, apresenta-se a resposta produtiva em experimento de longa duração conduzido pela Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia, GO, entre os anos de 2012 e 2020. Nesse experimento, 12 variedades foram submetidas ao primeiro protocolo de sistema irrigado proposto pela equipe de pesquisa, e detalhado a seguir: Irrigação por aspersão com molhamento de área total, tipo pivô central, e manejo da irrigação via clima, com aferição via solo. A correção de solo foi realizada para alcançar 70% de saturação por bases e a fosfatagem para atingir 15 ppm de P₂O₅ (resina). O preparo de solo incorporou os corretivos a 35 cm de profundidade com grade pesada. A gessagem foi calculada conforme Sousa *et al.* (2016). Adubações anuais com N, P e K, divididas em 3 parcelas foram aplicadas a lanço, em área total, sobre a superfície. A área não recebeu adubação corretiva de micronutrientes, nem adubação via água de irrigação, nem quimigação. Utilizou-se anualmente inibidor de florescimento, mas não maturadores. Aplicações anuais de 500 kg de calcário dolomítico e 400 kg de gesso foram realizadas imediatamente após cada corte. Todas as operações agrícolas, controle de erva-daninha e tratos fitossanitários foram realizadas empregando os mesmos métodos e maquinários adotados em área comercial de sequeiro da usina.

26.9.1 Toneladas de colmo por hectare

Na análise de dados de literatura (Figura 2A), tanto experimentações que antecedem o ano 2000 quanto posteriores, o TCH (toneladas de colmo por hectare) em sistema irrigado supera o sistema de sequeiro. O valor máximo de TCH nas experimentações anteriores ao ano 2000 excedia pouco as 140 toneladas, ao passo que, nas últimas duas décadas, esse patamar superou as 200 toneladas por hectare.

Antes de 2000, o ganho médio de TCH conferido pelo sistema irrigado era de 23,3 toneladas superior ao de sequeiro. Após 2000, o ganho médio do conjunto de experimentos alcançou 30,4 toneladas, um aumento de 30%. Esse aumento da diferença de TCH entre o sistema sequeiro e irrigado evidencia o ganho de domínio da tecnologia de sistema irrigado de produção. Esse avanço tecnológico também fica evidente ao observar a maior dispersão de resultados para o sistema irrigado após 2000. Confirmando a experiência empírica, os dados mostram que, quando não se domina o sistema irrigado de forma holística, os ganhos de TCH são marginais, ao passo que quando aplicado em elevado padrão de domínio, as diferenças são acentuadas, podendo entregar um TCH até 100% superior ao sequeiro.

Além de áreas experimentais, elevadas produtividades de cana-de-açúcar irrigadas por pivô central em solos com boa fertilidade têm sido reportadas. No Noroeste

e Norte Mineiro, Semiárido e Cerrado Nordestino, Noroeste e Sudoeste Goiano e Cerrado de São Paulo, são inúmeros os relatos de produtividade de canavial de 12 meses superando as 200 toneladas por hectare em áreas comerciais de usinas. Em algumas áreas da Usina Jalles Machado e Usina Otávio Lage, em Goianésia (GO) e em experimentação em Planaltina (DF) (BUFON *et al.*, 2013) também reportaram produtividades acima de 200 t ha⁻¹.

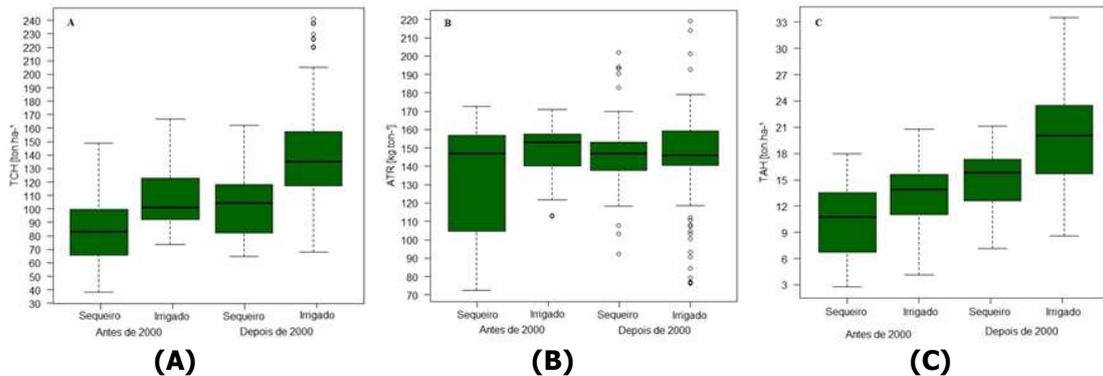


Figura 2. Valores de TCH (A), ATR (B) e TAH (C) de experimentos com cana-de-açúcar de sequeiro e irrigada em 17 estudos publicados no Brasil e no Mundo antes do ano 2000 e em 25 estudos posteriores ao ano 2000.

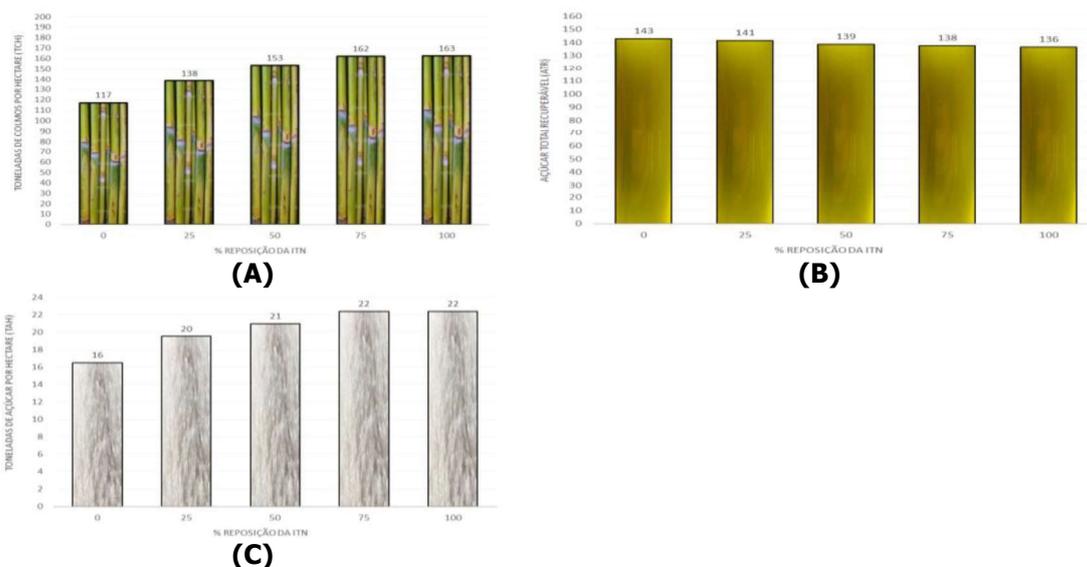


Figura 3. Resposta produtiva da cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectare (TCH) (A), açúcar total recuperável (ATR) (B) e toneladas de açúcar por hectare (TAH) (C), em experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, GO, quando submetida a sistema irrigado de produção. Os tratamentos refletem 5 níveis de reposição da irrigação total necessária (ITN), e sendo a testemunha (0% da ITN) conduzida em sequeiro e adicionada de uma lâmina de salvamento de 60mm aplicada imediatamente após a colheita. Resultados médios de 8 anos e 12 variedades, entre os anos de 2012 e 2020.

Na experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado (Figura 3A), a média acumulada de TCH para 8 cortes e 12 variedades atingiu-se 162 toneladas quando 75% da irrigação total necessária foi suprida. A variedade de menor responsividade, SP860042 atingiu média de 140 e, a mais responsiva, RB96 6928, atingiu 193 toneladas na média de 8 anos. De forma geral, incluindo variedades mais e menos responsivas, o sistema irrigado produziu 45 toneladas de colmo por ano a mais

que a produção de sequeiro, tendo algumas variedades entregado diferença superior a 60 toneladas na média de 8 anos.

26.9.2 Açúcar total recuperável

Adotando práticas nutricionais de pré-maturação e a estratégia de cálculo do *drying-off* equivalente a duas vezes a CTA do solo têm resultado, frequentemente, em valores de ATR superiores às áreas de sequeiro, comprovando o potencial do sistema irrigado de extrair melhor o potencial genético da cana. Com isso, além dos ganhos em TCH, um canavial irrigado e com manejo adequado de *drying-off* também pode entregar ganhos expressivos de ATR e, conseqüentemente, agregar TAH tanto pela massa de colmos quanto por sua qualidade.

Na curva de aprendizado em sistema irrigado de produção, normalmente, atinge-se a otimização de TCH antes de se dominar a otimização da maturação. Por essa razão, é esperado que, pelo menor entendimento do comportamento da curva de maturação das variedades em condição irrigada, o desempenho de ATR no sistema irrigado seja, com frequência, inferior ao da produção de sequeiro.

Nota-se na Figura 2B que, na média dos 42 experimentos analisados, sistemas irrigados auferiram valores de ATR semelhantes aos de sequeiro, ao redor de 145 kg t^{-1} . Mas, notadamente, a grande dispersão dos valores das experimentações posteriores a 2000 evidencia oportunidade de aprimoramento no domínio da técnica de *drying-off*.

Conforme apresentado na Figura 3B, a média acumulada de 8 cortes e 12 variedades, atingiu-se um ATR de 138 kg t^{-1} quando 75% da irrigação total necessária foi suprida, 5 kg abaixo do valor médio em sequeiro. Esse experimento foi conduzido entre 2012 a 2020 e, durante os 5 primeiros anos, até que a equipe dominasse melhor o *drying-off*, perdas de ATR ocorreram. Nos últimos 3 anos, os valores de ATR do sistema irrigado foram, no mínimo, iguais aos alcançados no sequeiro. Após a equipe ter dominado melhor a prática de *drying-off* (vide orientações na seção anterior) o padrão de valores de ATR iguais ou superiores às áreas de sequeiro tem se repetido na rede de experimentos que a Embrapa Cerrados conduz em diversas parceiras usinas do Cerrado.

26.9.3 Toneladas de açúcar por hectare

A análise das 42 publicações (Figura 2C) mostra que o valor médio de TAH (toneladas de açúcar por hectare) em sistema irrigado antes do ano 2000 era de, aproximadamente, 15 toneladas, ao passo que, nas últimas duas décadas, a média ultrapassou 20 toneladas e, com frequência, atingiu TAH acima de 30.

Tanto nas experimentações que antecedem o ano 2000 quanto nas posteriores, o TAH no sistema irrigado supera o sistema de sequeiro. Antes de 2000, na média dos experimentos, o sistema irrigado produziu TAH aproximadamente 3 toneladas superior ao sequeiro. Após 2000, o sistema irrigado produziu quase 6 toneladas, ou seja, 100% a mais que o sequeiro. Frequentemente, essas respostas chegam a incrementos de mais de 10 toneladas de açúcar por ano.

O aumento na diferença de TAH entre o sistema sequeiro e irrigado ao longo dos anos também evidencia o ganho de domínio tecnológico do sistema irrigado de produção. Assim como para o TCH, esse avanço tecnológico também fica evidente ao observar a maior dispersão de resultados de TAH para o sistema irrigado após 2000, confirmando observação empírica da equipe da Embrapa Cerrados.

A Figura 3C apresenta o resultado de TAH em experimentação conduzida pela Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia (GO). Na média acumulada de 8 cortes e 12 variedades, atingiu-se um TAH de 22 quando 75% da irrigação total necessária foi suprida. Na média dos 8 anos e 12 variedades, o sistema irrigado produziu anualmente 6 toneladas a mais de TAH que o sequeiro. Para algumas variedades essa diferença foi superior a 8 toneladas de açúcar. Com a experiência de *drying-off* acumulada até o momento, e baseando-se nos resultados dos últimos 3 anos, acredita-se que essa diferença pode facilmente ultrapassar 10 toneladas de açúcar por ano.

26.9.4 Produtividade da água

Em razão dos ganhos de produtividade do sistema irrigado de produção, tanto em relação a TCH quanto TAH, a produção irrigada pode ser mais eficiente no uso da água do que a produção de sequeiro (MOLDEN; OWEIS, 2010; CALGARO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013; BUFON *et al.*, 2014; OLIVER; SINGELS, 2015; SINGH, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019).

Segundo Olivier e Singels (2015), estudos relacionados à PA (produtividade da água) na cana-de-açúcar ao redor do mundo reportam valores variando normalmente entre 6 a 12 kg m⁻³. Mas, enquanto observando quatro ciclos (planta e 3 socas) na África do Sul, Olivier e Singels (2015) verificaram PA entre 7 a 13 kg m⁻³, e que a manutenção da palhada e o manejo criterioso da irrigação favoreceram os valores mais altos.

No Brasil, vários trabalhos apresentaram resultados de PA no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar (CALGARO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013; BUFON *et al.*, 2014) encontrando valores entre 7,2 e 14,2 kg m⁻³.

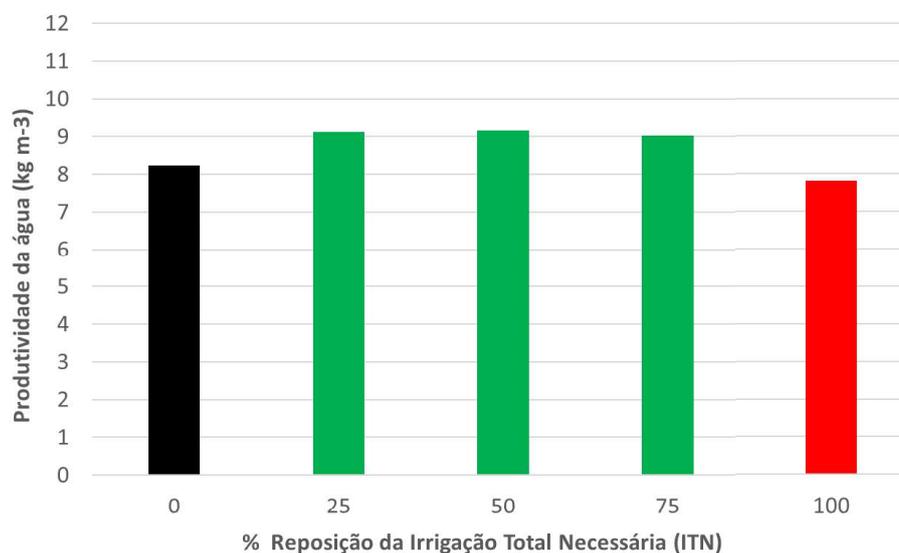


Figura 4. Produtividade da água (PA) de cana-de-açúcar, em kg m⁻³, em experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, GO, quando submetida a sistema irrigado de produção. Os tratamentos refletem 5 níveis de reposição da irrigação total necessária (ITN), sendo a testemunha (0% da ITN) conduzida em sequeiro e adicionada de uma lâmina de salvamento de 60 mm aplicada imediatamente após a colheita. Resultados médios de 8 anos e 12 variedades, entre os anos de 2012 e 2020.

O resultado dos experimentos de longa duração da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia (GO) (Figura 4) indicam que, com exceção da estratégia de atendimento de 100% da irrigação total necessária, todas estratégias de irrigação

deficitária resultaram em ganhos de PA, geralmente superiores a 15%. Para as variedades mais responsivas, estratégias de irrigação deficitária frequentemente auferiram ganhos de PA superiores a 50%.

26.10 Plano de investimentos em produção irrigada

O Plano de Investimentos em Produção irrigada deve garantir, simultaneamente, a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos e a otimização dos investimentos em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. Normalmente, esse plano passa por três etapas: (i) inventário de disponibilidade hídrica e aptidão, (ii) planejamento hídrico estratégico, e (iii) plano diretor de investimentos.

A primeira etapa Inventário de disponibilidade hídrica e aptidão levanta toda vazão outorgada e outorgável dentro dos limites da usina, e classifica suas áreas quanto a aptidão edafoclimática e logística para receberem um sistema irrigado de produção.

Na segunda etapa, elabora-se o Plano Hídrico Estratégico, que define como será utilizada a disponibilidade hídrica para verticalizar a produção. Nessa etapa, define-se quais talhões receberão o sistema irrigado, e qual será a época de colheita e a produtividade esperada de cada um deles. Esse processo define o papel de cada talhão sob sistema irrigado na estratégia global da usina. Com essas informações, define-se a demanda hídrica que deverá ser suplementada em cada área. Cada nível de satisfação hídrica e produtividade esperada gera um protocolo agrônômico e premissas de projeto de irrigação.

Normalmente, devido à limitação de recursos hídricos, a estratégia caminha para lastrear uma fração da produção da usina sob sistema irrigado, onde será mitigado o risco climático, e o restante da usina é direcionada para o sistema de sequeiro. Nesse caso, da área total demandada para moagem, a fração com piores solos, e as piores janelas de plantio e colheita são direcionadas para produção irrigada, muito menos sensível a esses fatores. E as melhores áreas, janelas de plantio e colheita são direcionadas para fração em sistema de sequeiro. Dessa forma, os investimentos na fração irrigada geram um impacto positivo também na área de sequeiro.

Mesmo nos casos excepcionais em que a disponibilidade hídrica permite que a totalidade da área da usina esteja sob produção irrigada, o planejamento hídrico estratégico ainda é fundamental. Nesse caso, em função da época de colheita e produtividade alvo de cada área, ainda será necessário ordenar os talhões por nível de demanda hídrica e, conseqüentemente, orientar protocolos agrônômicos e premissas de projeto de irrigação específicos para cada nível.

A terceira etapa é o plano diretor de investimentos em sistema irrigado. No plano diretor, estrutura-se a estratégia e velocidade de implementação, faz-se análise preliminar de viabilidade financeira, e estrutura-se o ordenamento dos investimentos por prioridades. Nesta etapa, projetos básicos de engenharia e análises de fluxo de caixa para áreas individuais podem ser necessários para subsidiar e direcionar a priorização das áreas que receberão primeiro o sistema irrigado.

Uma questão recorrente e controversa durante a fase de planejamento hídrico estratégico diz respeito à priorização para o sistema irrigado de canaviais colhidos no início, meio ou final da safra. Há casos de projetos e usinas com a totalidade de sua área irrigada e que, por isso, não precisam fazer essa escolha. Mas esses casos são exceção. Na maior parte dos casos será necessário decidir qual canal irrigar, seja por limitação financeira para investir em irrigação, seja por limitação de disponibilidade hídrica.

Normalmente, prioriza-se o canavial de final de safra, dada a maior deficiência hídrica e quebra da produtividade em áreas de sequeiro colhidas nesse período (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; CARVALHO *et al.*, 2019). Contudo, alguns resultados experimentais também podem embasar uma estratégia diferente.

Primeiramente, as evidências de campo mostram que, na verdade, no longo prazo, os maiores ganhos de produtividade (TAH) não estão associados à decisão de que canavial se escolhe irrigar (início, meio ou final de safra), mas do domínio do sistema de produção irrigado, o que passa pela seleção da variedade, da adoção das melhores estratégias de manejo da irrigação, da fertilidade e do trato fitossanitário.

Segundo, porque a maior probabilidade de acerto na estratégia de *drying-off* está em canavial irrigado de meio de safra, pela menor probabilidade de ser afetada por evento de chuva inesperada.

Em terceiro lugar, quando a usina está realizando os primeiros investimentos em produção irrigada e depende do retorno financeiro de um projeto específico para custear os demais, ao invés de olhar a estratégia geral da usina, pode preferir analisar a área irrigada como um projeto financeiro em si mesmo - quase com um CNPJ próprio, almejando que a área entregue o maior retorno financeiro possível, sem compará-la a uma área de sequeiro. Quando essa visão predomina, é inevitável perceber que, se por um lado a diferença de TAH entre sequeiro e irrigado é maior no final de safra, por outro lado, o custo do projeto de irrigação também aumenta à medida que se avança na safra, dado que a deficiência hídrica aumenta. Por isso, o melhor retorno financeiro por tonelada de cana (ou de açúcar) pode ser superior em canavial colhido no início ou meio de safra.

Em quarto lugar, pode-se considerar que, ao se direcionar os piores solos para produção irrigada em início e meio de safra, também se obterá ganho de produtividade no canavial de sequeiro colhido em final de safra que migrar para solos melhores e melhores janelas de plantio.

Em quinto lugar, considerando que a grande maioria das usinas no Brasil não possui experiência com sistemas modernos de produção irrigada de cana e que o aprendizado dessa tecnologia necessita de algum tempo e experiência prática, pode-se concluir ser mais fácil começar a dominar a tecnologia com um canavial irrigado para colheita no meio da safra, onde a probabilidade de acerto do *drying-off* é maior. Por essas razões, entendemos que o início da curva de aprendizado do sistema irrigado de produção de cana para a maioria das usinas pode ser facilitado com a escolha de canaviais de meio da safra, entre o início de julho e, no mais tardar, até a primeira quinzena de agosto.

26.11 Viabilidade econômica

Primeiramente, é fundamental perguntar se haverá sustentabilidade econômica para o setor sucroenergético brasileiro caso continue produzindo nos moldes atuais, com produção de sequeiro. A resposta para essa pergunta pode ser negativa, dada a tendência de redução e volatilidade de preços de *commodities* agrícolas (CASHIN *et al.*, 2002), os riscos climáticos crescentes (MARIN; NASSIF, 2013; ZILLI *et al.*, 2020) e os avanços tecnológicos e de eficiência experimentados pela concorrência, como o açúcar de beterraba (RAJAEIFAR *et al.*, 2019), o etanol de milho (OLIVEIRA *et al.*, 2018), os carros elétricos (SCHMIDT *et al.*, 2011), entre outros.

Por isso, é urgente a verticalização do setor sucroenergético brasileiro, elevando cada vez mais sua eficiência e reduzindo custos de insumos, terra, e outros recursos naturais. Para isso, atualmente, não há estratégia melhor do que a conversão de fração

produção de cana-de-açúcar de sequeiro para o sistema irrigado. Hoje, essa é a única alternativa prontamente disponível para mudar substancialmente, em curto e médio prazo, os patamares de produtividade e o custo do setor sucroenergético brasileiro.

No Brasil, com boa gestão, há recursos hídricos abundantes para isso (MULTSCH *et al.*, 2020). Também está disponível as melhores tecnologias do mundo para engenharia e manejo de irrigação. Resta a intensificação da colaboração entre instituições de pesquisa, empresas de irrigação e setor produtivo para continuar desenvolvendo, comunicar, capacitar e evidenciar ainda mais a viabilidade técnica e econômica dessa estratégia. Diversos grupos e produtores que são referência em inovação tecnológica na produção sucroenergética já caminham a passos largos nessa direção – muitos até com estratégias sigilosas para acentuar sua vantagem competitiva. Mas é importante que esse seja um movimento de todo o setor e não apenas de poucos grupos.

Um erro recorrente ao avaliar a viabilidade econômica de sistemas irrigados é considerar única e exclusivamente o ganho de produtividade de colmos. De fato, o ganho de TCH é muito importante pois, além de aumentar receita, dilui os custos por tonelada produzida. Mas, como expressado ao longo deste capítulo, há muito mais vantagens.

Vale destacar que, no sistema irrigado, é possível atingir níveis de ATR iguais ou superiores a áreas de sequeiro. Por isso, aumenta-se substancialmente a produção de TAH, tanto pelo aumento de TCH quanto pelo aumento de ATR.

Além do aumento de receita direta e diluição de custos por unidade produzida, ainda há redução de custos por ganho de eficiência operacional nas principais, senão todas, operações agrícolas.

Pode-se destacar a redução do custo de plantio e preparo e custo da terra, um dos maiores custos da fase agrícola. No final de um ciclo de 10-12 anos de produção irrigada, se produz mais TAH do que se essa fosse uma área de sequeiro. Ganha-se no TAH anual e no acumulado em razão da maior longevidade. Conseqüentemente, haverá mais TAH para diluir o custo de plantio e custo da terra. Ou seja, custo da terra, custo de preparo e custo de plantio por TAH também são menores no sistema irrigado.

Há ainda os ganhos de eficiência nas outras operações agrícolas. A operação em menor área para produzir a mesma quantidade de açúcar reduz os custos de capital (inclusive maquinário), de mão-de-obra, administrativo, etc. Ainda pode-se considerar as facilidades e ganhos de eficiência na gestão ocasionadas pela redução da área.

Deve-se ainda considerar o ganho de produtividade, longevidade e redução de custos das áreas de sequeiro, que migram para os melhores ambientes e janelas de plantio da usina à medida que os piores ambientes e janelas de plantio são absorvidos pelo sistema irrigado.

Por fim, a maior produtividade eleva a eficiência das colhedoras por hora trabalhada e reduz as distâncias percorridas por colhedoras, transbordos e carretas para atender a moagem da usina. Ou seja, a verticalização das áreas com sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar resulta em aumento de eficiência e redução acentuada de um dos principais custos do setor, o CTT.

Dito isso, considerando apenas os ganhos diretos (sem contar os vários ganhos indiretos apontados acima), calculamos um *payback* aproximado de três anos para o investimento em sistema irrigado de produção. Depois desse prazo, o produtor terá pelo menos mais 7 a 9 anos de vida útil de equipamento para usufruir dos ganhos do sistema irrigado. Variações ocorrerão em função da natureza de cada projeto.

26.12 Considerações finais

Os dois argumentos mais relevantes contra a viabilidade econômica, na verdade, não têm relação com a viabilidade do sistema em si. O primeiro argumento é a falta de domínio da tecnologia para extrair seu potencial. Como em qualquer outro sistema, a única solução é buscar apoio técnico e começar a exercitar o sistema de produção irrigada em uma pequena fração de sua área – evoluindo na curva de aprendizado e domínio tecnológico. Como esse aprendizado demanda tempo, não começar o quanto antes pode custar a sobrevivência do negócio. O segundo argumento relevante é a fragilidade financeira para iniciar os investimentos em sistemas de irrigação. Para isso, não há outra solução além de estruturar um Plano de Investimentos em Sistema Irrigado, incluindo as etapas do inventário de disponibilidade hídrica, planejamento hídrico estratégico e plano diretor de investimentos. Também é uma estratégia viável utilizar os ganhos das primeiras etapas de investimento em produção irrigada para custear a expansão para novas áreas irrigadas. Isso é mais plausível do que imaginar que a expansão da área irrigada será custeada pelos ganhos incertos da área de sequeiro.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, **Irrigation and drainage paper**, 56, 300p., 1998.

APARECIDO, L.E.O.; MENESES, K.C.; TORSONI, G.B.; MORAES, J.R.S.C.; MESQUITA, D.Z. Accuracy of potential evapotranspiration models in different time scales. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.63-80, 2020.

ARALDI, R.; SILVA, F.M.L.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, n.3, p.694-702, 2010.

ARAÚJO, L.G. **Gesso Agrícola na cana-de-Açúcar: Produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2018.

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.19, p.952-958, 2012.

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.588-594, 2013.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de Irrigação**, 9 Ed., Viçosa, UFV, 545p., 2019.

BHUIYAN, M.Z.I.; WANG, S.; CARTER, J.; RAKA, T.M. Calibration and assessment of capacitance based soil moisture sensors. Geo-Congress, p.754-766, 2020.

BOSQUILIA, R.W.D.; NEALE, C.M.U.; DUARTE, S.N.; LONGHI, S.J.; FERRAZ, S.F.B.; MULLER-KARGER, F.E. Evaluation of evapotranspiration variations according to soil type using multivariate statistical analysis. **Geoderma**, v.355, n.1, p.1-11, 2019.

BUFON, V.B.; FONTOURA, P.; BRENN, R.; ZUKETTA, R.; MESQUITA, J.; FEITOSA, W. Sugarcane in the Brazilian Savanna (Cerrado): Effects of irrigation on biomass production and water use efficiency. American Society of Biological and Agricultural Engineering. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. Montreal, Canada, 2014.

- BUFON, V.B.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, J.M.; *et al.* Acúmulo e partição de biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos na região do cerrado. **STAB**, p.178-183, 2016.
- BUFON, V.B.; MESQUITA, J.; ZUKETTA, R.; BATISTA, L.T.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. Sugarcane in the Brazilian Savanna (Cerrado): Effects of irrigation on biomass production and partitioning. American Society of Biological and Agricultural Engineering. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. Kansas City, 2013.
- CABRAL, O.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v.4, p.555-565, 2012.
- CABRAL, O.M.R.; DA ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; FREITAS, H.C.; LIGO, M.A.V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (Cerrado) in southeast Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.4, n.PB, p.22-40, 2015.
- CALGARO, M.; SIMÕES, W.L.; PINTO, J.M.; BRAGA, M.B.; SOARES, J.M.; SOUZA, M.A. de; LIMA, J.A. Eficiência do uso da água de irrigação em dois sistemas de cultivo de cana-de-açúcar de segunda soca no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 23, Luís Eduardo Magalhães. **Anais**, 2013.
- CARR, M.K.V; KNOX, J.W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. **Experimental Agriculture**, v.47, n.1, p.1-25, 2011.
- CARVALHO, T.B.; RESENDE, R.S.; RODRIGUES, R. Water use efficiency in the sugarcane cropping in different planting dates in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v.14, n.18, p.794-800, 2019.
- CASAROLI, D.; ALVES JÚNIOR, J. A.; EVANGELISTA, A. W. P. Quantitative and qualitative analysis of sugarcane productivity in function of air temperature and water stress. **Comunicata Scientiae**, v.10, n.1, p.203-212, 2019.
- CASHIN, P.; McDERMOTT, J. The long-run behavior of commodity prices: small trends and big variability. **IMF Staff Papers** v.49, n.2, p.1-25, 2002.
- CLEMENTE, P.R.A.; BEZERRA, B.K.L.; SILVA, V.S.G.; SANTOS, J.C.M.; ENDRES, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.1, p.100-117, 2017.
- CUNHA, F.F.; RAMOS, M.M.; ALENCAR, C.A.B. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.2, p.351-357, 2010.
- DONALDSON, R.; BEZUIDENHOUT, C. Determining the maximum drying off periods for sugarcane grown in different regions of the South African industry. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, v.74, n.1, p.162-166, 2000.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, n.33, 1979.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.Y.; GHEYI, H.R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v.28, n.3, p.494-506, 2008.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.
- FRANCISCO, P.R.M.; GUIMARÃES, C.L.; SABOYA, L.M.F.; DANTAS NETO, J.; SANTOS, D. Aptidão climática da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.10, n.3, p.676-686, 2016.
- HAGOS, H.; WORKU, W.; TAKELE, A. Effect of drying off period and harvest age on quality and yield of ratoon cane (*Saccharum officinarum* L.). **Advances in Crop Science and Technology**, v.2, n.3, p.5, 2014.

HSIAO, T.C.; ACEVEDO, E. Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. **Agricultural Meteorology**, v.14, p.59-84, 1974.

INMAN-BAMBER, N.G. Crop response to water stress. In: BRUCE, R. **Best Practice Irrigation in Sugarcane Production Short Course**. Course Manual. Townsville. 229p. 2002.

INMAN-BAMBER, N.G. Efficient use of water resources in sugar production: a physiological basis for crop response to water supply. **Sugar Research Australia**, p.39, 1999.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G.; JAGER, M. Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature in field grown sugarcane. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, p.156-161, 1986.

INMAN-BAMBER, N.G.; SINGELS, A.; MUCHOW, R.C. A systems approach to benchmarking for sugarcane production in Australia and South Africa. **Proceeding of South African Sugarcane Technologists' Association**, v.72, p.3-9, 1998.

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

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v.144, p.351-360, 2009.

LEÃO, T.P.; COSTA, B.F.D.; BUFON, V.B.; ARAGÓN, F.F.H. Using time domain reflectometry to estimate water content of three soil orders under savanna in Brazil. **Geoderma Regional**, v.21, p.13, 2020.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao *deficit* hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MARIN, F.; NASSIF, D.S.P. Climate change and the sugarcane in Brazilian: Physiology, conjuncture and future scenario. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.232-239, 2013.

MARIN, F.R.; INMAN-BAMBER, G.; SILVA, T.G.F. Evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical and Applied Climatology**, v.140, n.3-4, p.1349-1357, 2020.

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA, G.B. Productivity of sugarcane cultivars in different soils and harvesting periods. **Scientia Agricola**, v.58, n.2, p.295-301, 2001.

MOLDEN, D.; OWEIS, T. STEDUTO, P.; BINDRABAN, P.; HANJRA, M.A.; KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v.97, p.528-535, 2010.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v.16, n.3, p.264-276, 2014.

MULTSCH, S.; KROL, M.S.; PAHLOW, M. Assessment of potential implications of agricultural irrigation policy on surface water scarcity in Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.24, n.1, p.307-324, 2020.

OHASHI, P.; PIRES, D.M.; RIBEIRO, R.V.; SILVA, A.L.B.O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, n.2, p.131-138, 2015.

OLIVEIRA, F.M.; ASPIAZU, I.; KONDO, M.K.; BORGES, I.D.; PEGORARO, R.F.; VIANNA, E.J. Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. **Revista Ceres**, v.59, n.6, p.832-840, 2012.

- OLIVEIRA, L.A.; MIRANDA, J.H.; COOKE, R.A.C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.201, p.199-206, 2018.
- OLIVIER, F.C.; DONALDSON, R.A.; SINGELS, A. Drying off sugarcane on soils with low water holding capacity. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, v.80, n.1, p.183-187, 2006.
- OLIVIER, F.; SINGELS, A. A database of crop water use coefficients for irrigation scheduling of sugarcane. **Proceedings South Africa Sugarcane Technology Association** v.75 p.81-83. 2001.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. **Field Crops Research**, v.80, n.1, p.87-98, 2015.
- PEREIRA, L.F.M.; FERREIRA, V.M.; OLIVEIRA, N.G. Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. In: Academia Brasileira de Ciências. **Anais**. v.89, n.2, p.1231-1242, 2017.
- PINCELLI, R.P.; SILVA, M.D.A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v.28, n.4, p.546-556, 2012.
- PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.9, p.1-7, 2014.
- PRADO, H.; VAN LIER, Q.J.; LANDELL, M.G.A.; VASCONCELOS, A.C.M. Classes de disponibilidade de água para cana-de-açúcar nos principais solos. 2018. Disponível em: https://www.pedologiafacil.com.br/artig_4.php. Acesso em: 13 mai. 2021.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference manual**. FAO, May, p.302, 2018. Disponível em: www.fao.org/publications. Acesso em: 1 abr. 2021.
- RAJAEIFAR, M.A.; SADEGHZADEH HEMAYATI, S.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; MAHMOUDI, S.B. A review on beet sugar industry with a focus on implementation of waste-to-energy strategy for power supply. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.103, January, p.423-442, 2019.
- ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off of sugarcane before harvest. **Field Crops Research**, v.55, p.201-208, 1998.
- ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v.64, p.211-227, 1999.
- ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; DONALDSON, R.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; WOOD, A.W. Estimating the risk associated with drying-off strategies for irrigated sugarcane before harvest. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.50, p.65-78, 1999.
- SANTOS, J.M. **Índice de área foliar de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos no cerrado**. 121p. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- SCHMIDT, J.; GASS, V.; SCHMID, E. Land use changes, greenhouse gas emissions and fossil fuel substitution of biofuels compared to bioelectricity production for electric cars in Austria. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.9, p.4060-4074, 2011.
- SCHWARTZ, R.C.; EVETT, S.R.; ANDERSON, S.K.; ANDERSON, D. Evaluation of a direct-coupled time-domain reflectometry for determination of soil water content and bulk electrical conductivity. **Vadose Zone Journal**, v.15, n.1, p.1-8, 2016.
- SCHWARTZ, R.C.; EVETT, S.R.; DOMÍNGUEZ, A.; LÉLLIS, B.C.; PARDO, J.J. Soil water and bulk electrical conductivity sensor technologies for irrigation and salinity management. In: Joint

- FAO/IAEA Programme (Org.). Landscape Salinity and Water Management for Improving Agricultural Productivity. Vienna: International Atomic Energy Agency, p.121-146, 2020.
- SILVA, A.L.B.O. **Produção e eficiência no uso da água de quatro cultivares de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial em Campinas, SP**. 45p., 2014. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Campinas: IAC, 2014.
- SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G.; SANTOS, C.M.; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **Journal of Agricultural Science**, v.152, n.1, p.104-118, 2014.
- SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I. Economic depth of drip irrigation on sugarcane. **Irriga**, v.1, n.2, p.37-46, 2015.
- SILVA, V.P.R.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGES, C.J.R.; SOUSA, I.F.; DANTAS NETO, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.128, p.102-109, 2013.
- SINGELS, A.; LAAN, M. Sugarcane. In: STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES D. (Ed.), Crop yield response to water (p.174-180). Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.66, 2012.
- SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. The effect of water stress on sugarcane biomass accumulation and partitioning. **Proceedings of South African Sugar Technologists' Association**, v.74, p.169-172, 2000.
- SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N.I. A simple computerized irrigation scheduling method for sugarcane. **Proceedings of South African Sugar Technologists' Association**, v.72, p.117-122, 1998.
- SINGELS, A.; VAN DEN BERG, M.; SMIT, M.A.; JONES, M.R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, v.117, n.1, p.59-69, 2010.
- SINGH, I. Growth, yield, irrigation water use efficiency, juice quality and economics of sugarcane under different irrigation scheduling. **Sugar Tech**, v.20, n.1, p.29-35, 2018.
- SMIT, A.L.; GEORGE, E.; GROENWOLD, J. Root observations and measurements at transparent interfaces with soil. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Ed.), **Root methods: A handbook**. Berlin: Springer-Verlag, p.235-271, 2000.
- SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.
- SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.
- VAZQUEZ, M.; TEREZA, M.; RAMOS, B. Influência da deficiência hídrica no florescimento e características tecnológicas da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.4, p.461-466, 1989.
- VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DELAZARI, F.T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, v.18, n.3, p.426-441, 2013.
- VINÍCIUS, M.P.; SILVA, J.F.; SILVA, E.D.S.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; MOUSINHO, F.E.P. Parâmetros fisiológicos de variedades de cana-de-açúcar submetidas a distintos regimes hídricos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, n.4, p.509-518, 2017.
- ZHANG, H.; OWEIS, T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v.38, p.195-211, 1999.
- ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A.C. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v.740, p.1-32, 2020.