

DESEMPENHO PRODUTIVO E RETORNO ECONÔMICO DA CULTURA DO SORGO SUBMETIDA À IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agríc.v35n4p676-688/2015>

ANDERSON L. ZWIRTES¹, REIMAR CARLESSO², MIRTA T. PETRY³,
JUNIOR KUNZ⁴, GUILHERME K. REIMANN⁵

RESUMO: A irrigação deficitária é comumente utilizada em regiões de reduzida disponibilidade de água ou de energia para a irrigação e visa incrementar a eficiência de uso da água. Essa técnica pode ser adequada à cultura do sorgo, que apresenta produtividades satisfatórias, mesmo em condições limitadas de disponibilidade de água no solo. Os objetivos do trabalho foram: avaliar os efeitos de diferentes manejos de irrigação deficitária sobre o índice de área foliar, altura de plantas e rendimento de grãos do sorgo, e identificar o nível crítico de irrigação deficitária que proporciona maior produtividade da água irrigada e retorno econômico. O experimento foi desenvolvido no ano agrícola de 2012/2013, sob uma cobertura móvel, que impedia a ocorrência de chuva na área experimental. Foram testados quatro manejos de irrigação deficitária: 100; 75; 50 e 25% de reposição da evapotranspiração da cultura (ET_c). A redução de 25% na reposição da ET_c resultou na diminuição de 7% na altura das plantas, 5% no índice de área foliar e 17% no rendimento de grãos. A maior receita líquida da cultura foi alcançada utilizando o manejo de irrigação com reposição de 75% da ET_c . A produtividade da água e o retorno econômico da aplicação de água apresentaram uma resposta linear positiva em relação à redução na reposição da ET_c .

PALAVRAS-CHAVE: evapotranspiração da cultura, produtividade da água irrigada, *Sorghum bicolor*.

PRODUCTIVE PERFORMANCE AND ECONOMIC RETURN OF SORGHUM CROP SUBMITTED TO DEFICIT IRRIGATION

ABSTRACT: The deficit irrigation is commonly used in regions of reduced water and energy availability for irrigation with a view to increase water use efficiency. This technology can be a strategy to increase sorghum production under the conditions of limited soil water availability. The objectives of this study were to: (i) evaluate the effects of different deficit irrigation management on leaf area index, plant height and grain yield of sorghum, and (ii) identify the critical level of deficit irrigation for optimum irrigated water productivity and economic return. The experiment was conducted in a Rainout Shelter during the 2012/13 cropping season. The deficit irrigation management consisted of water replacement in the crop root zone by: 100, 75, 50 and 25% of crop evapotranspiration (ET_c). A 25% reduction in the replacement of ET_c resulted in about 7% decrease in plant height, 5% in leaf area index and 17% in sorghum grain yield. The highest net revenue of the culture was achieved using ET_c replacement of 75%. The water productivity and economic return of water application showed a positive linear response in relation to the reduction in ET_c replacement.

KEYWORDS: crop evapotranspiration, irrigation water productivity, *Sorghum bicolor*.

¹ Engº Agrícola Ms.C., Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM/Santa Maria - RS, Fone: (55) 99013166, andersonzwirtes@yahoo.com.br

² Engº Agrícola, PhD. Professor Titular do Departamento de Engenharia Rural, UFSM/Santa Maria - RS, carlesso@ccr.ufsm.br

³ Engº Agrícola, Dr. Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Rural, UFSM/Santa Maria - RS, mirta@ccr.ufsm.br.

⁴ Engº Agrícola, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFSM/Santa Maria - RS, junioragrokunz@gmail.com

⁵ Aluno de Graduação em Agronomia, UFSM/Santa Maria - RS, guilhermereimann@hotmail.com

Recebido pelo Conselho Editorial em: 8-8-2013

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 14-2-2014

INTRODUÇÃO

A água é um fator essencial para a produção agrícola, e sua disponibilidade e distribuição podem definir a viabilidade de qualquer atividade agropecuária (FAGGION et al., 2009). Para aumentar a disponibilidade de alimentos em nível mundial, e atender às necessidades de alimentos e fibras, é necessário incrementar a produção agrícola (HOWELL, 2001). É sabido que o volume de água atualmente utilizado para uso agrícola está decrescendo, forçando a busca pela otimização no manejo da água irrigada (SINGH & PANDA, 2012) e o incremento em produtividade das culturas. Consequentemente, é necessário proceder o manejo da água irrigada que incremente a produção, com menor consumo de água, principalmente em regiões com limitação física de recursos hídricos.

Tradicionalmente, as pesquisas na agricultura têm focado na obtenção da máxima produtividade. Entretanto, investigações recentes (GEERTS & RAES, 2009; KLOCKE et al., 2010) têm alertado sobre a limitação nos recursos terra e água, razão pela qual, as estratégias de irrigação deficitária têm sido indicadas para regiões secas ou com distribuição irregular de chuvas. As irrigações deficitárias consistem na aplicação de lâminas de irrigação menores que as necessárias para satisfazer plenamente as necessidades hídricas das culturas (RODRIGUES et al., 2013).

De acordo com ENGLISH (2002), o manejo da irrigação em condições de reduzida disponibilidade de água precisa resultar no melhor retorno econômico por unidade de água aplicada. Usualmente, essa estratégia de manejo de irrigação é utilizada em regiões com restrição hídrica, e as irrigações são aplicadas preferencialmente em períodos nos quais a cultura é mais sensível aos efeitos negativos do déficit hídrico (GEERTS & RAES, 2009; LIMA et al., 2012). A irrigação deficitária pode ser utilizada na agricultura irrigada sem ocasionar perdas expressivas de produtividade, podendo atingir patamares elevados na produtividade da água (GEERTS & RAES, 2009; DU et al., 2010) que pode ser alcançada quando a cultura é submetida ao déficit hídrico, porém este déficit deve manter a viabilidade econômica da produção (PEREIRA et al., 2012).

A cultura do sorgo (*Sorghum bicolor*) apresenta elevada produção de biomassa, rusticidade e maior tolerância ao déficit hídrico em relação ao milho (ALBUQUERQUE et al., 2010). De acordo com KLOCKE et al. (2012), há uma resposta linear positiva do rendimento de grãos e a evapotranspiração da cultura (ET_c). A fase crítica de consumo de água pelas plantas de sorgo ocorre durante a emissão da panícula, quando deve ser mantida uma reposição de 100% da ET_c ; já no período vegetativo, as plantas podem ser mantidas com limitada reposição de água (BAUMHARDT et al., 2007).

A combinação de utilização de culturas com menor requerimento hídrico e a redução da área cultivada são, segundo KLOCKE et al. (2012), alternativas para regiões secas ou quando as chuvas são escassas. No cerrado brasileiro, a cultura do sorgo pode ser utilizada como uma opção para o cultivo de safrinha (cultivo em sucessão), visando à produção de grãos, ou ao fornecimento de resíduo vegetal para o sistema plantio direto (BASSO et al., 2011), podendo ser semeada após o cultivo de soja ou milho, pela sua maior tolerância ao déficit hídrico e ao fornecimento de matéria vegetal (DUARTE, 2009). No entanto, as condições hídricas tornam-se desfavoráveis devido à menor ocorrência de chuva durante o ciclo de desenvolvimento da cultura e a água armazenada no perfil do solo ser a principal responsável por suprir as necessidades hídricas das plantas. Segundo ALBUQUERQUE & MENDES (2011), a produtividade do sorgo está diretamente relacionada com a quantidade de água no solo disponível à cultura e com a demanda evaporativa da atmosfera. Nestes casos, a utilização de irrigação deficitária pode resultar em aumento positivo na eficiência do uso da água, impactando na produção e na qualidade de grãos e na produção de biomassa.

Avaliações de sistemas de manejo alternativo da água, do cultivo e de produção iniciam com o conhecimento das respostas da cultura à quantidade de água aplicada. A tomada de decisão em relação à utilização da irrigação deficitária está, segundo KLOCKE et al. (2012), em função dos preços dos commodities e do custo operacional, usados no cálculo do retorno econômico líquido. Dessa forma, os objetivos do presente trabalho foram: (i) avaliar os efeitos de diferentes manejos de irrigação deficitária, baseados em diferentes reposições da evapotranspiração da cultura, no índice de área foliar, na altura de plantas e no rendimento de grãos do sorgo, e (ii) identificar o nível

crítico de irrigação deficitária que proporciona maior produtividade da água irrigada e retorno econômico.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2012/2013, em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria-RS. A área está localizada na latitude de 29° 43' 40''S, longitude de 53°43'11''O e altitude de 103 m. O clima do local é classificado como do tipo "Cfa", de acordo com a classificação climática de Köppen (MORENO, 1961). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (SANTOS et al., 2006). O experimento foi desenvolvido sob uma cobertura móvel "*Rainout Shelter*", alocada sobre trilhos metálicos, com acionamento mecânico. A área experimental está localizada na parte central da cobertura móvel. A cobertura móvel era fechada momentos antes da ocorrência de qualquer precipitação pluvial, impedindo a entrada de água de precipitação pluvial sobre a área experimental. Para evitar a entrada de água subsuperficial nas parcelas na bordadura da área experimental, foi instalado um sistema de drenagem, constituído de um tubo corrugado perfurado (dreno horizontal) e manta de fibras geotêxteis, disposto da superfície do solo até o tubo. Esta manta possui em seu interior filamentos de polipropileno, o que lhe condicionava um alto índice de vazios, formando galerias de fluxo preferencial para a água, evitando a entrada de água por fluxos laterais.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições. As unidades experimentais apresentaram área superficial de 18 m² (3 x 6 m). Foram avaliados quatro manejos de irrigação deficitária na cultura do sorgo, sendo um de irrigação plena, com reposição de 100% da evapotranspiração da cultura (ET_c) e três tratamentos de irrigações deficitárias (75; 50 e 25% da ET_c). As irrigações foram aplicadas por um sistema de gotejamento com gotejadores autocompensantes, com espaçamento entre linhas de 0,50 m e 0,20 m entre gotejadores, vazão de 1,3 L h⁻¹ e pressão de serviço de 10 m c.a. O calendário de irrigação foi estabelecido em função da ET_c acumulada. A lâmina líquida de 30 mm era aplicada de acordo com os seguintes regimes:

I-100 (100% da ET_c): quando a ET_c = (ET_o × K_c) acumulada era de 30 mm;

I-75 (75% da ET_c): quando a ET_c = (ET_o × K_c) acumulada era de 40 mm;

I-50 (50% da ET_c): quando a ET_c = (ET_o × K_c) acumulada era de 60 mm;

I-25 (25% da ET_c): quando a ET_c = (ET_o × K_c) acumulada era de 120 mm.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada usando o método da FAO-Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). A ET_c foi estimada multiplicando-se a ET_o pelo coeficiente de cultura (K_{c simples}) proposto no FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Os dados meteorológicos diários foram obtidos de uma estação meteorológica automática situada a 150 m do local de instalação do experimento. Os tratamentos de irrigação foram implantados aos 12 DAE (dias após a emergência). Antes da implantação dos tratamentos, todas as parcelas experimentais receberam a mesma quantidade de irrigação necessária para o estabelecimento inicial da cultura.

O sorgo foi semeado no dia 20 de outubro de 2012, com espaçamento entre linhas de 0,5 m. A emergência da cultura foi observada no dia 25 de outubro, cinco dias após a semeadura, quando mais de 50% das plântulas estavam visíveis sobre a superfície do solo. O desbaste foi realizado aos 10 DAE, ajustando a densidade populacional para 190.000 plantas ha⁻¹. Utilizou-se da variedade de sorgo NIDERA A9735R, de ciclo precoce. Para o controle de pragas, foram realizadas três aplicações de inseticida sistêmico (ação de contato e ingestão), à base de Tiametoxam (neonicotinoide) e Lambda-cialotrina (piretroide), na dosagem de 200 mL ha⁻¹. As panículas de sorgo foram cobertas por sacos de papel, para evitar perdas de grãos devido ao ataque de pássaros.

Os resultados da análise química para a camada de 0-0,10 m indicou: pH (H₂O) 5,5; matéria orgânica de 3%; CTC (capacidade de troca de cátions) efetiva de 8,7 cmol_c dm⁻³; saturação por base de 71,7%; teor de argila de 19%; fósforo (P-Mehlich) de 42 mg dm⁻³, e potássio de 268,0 mg dm⁻³. De acordo com a CQFS - RS/SC (2004), esses resultados correspondem a teores médios (3%) de

matéria orgânica e CTC, alto teor de fósforo e muito alto de potássio. A adubação foi realizada com base na análise química do solo, seguindo a recomendação da CQFS-RS/SC (2004), com expectativa de produção de 7.000 kg ha^{-1} . A adubação de base foi constituída de 20 kg ha^{-1} de nitrogênio (N) e 95 kg ha^{-1} de fósforo (P_2O_5). A análise química indicou nível muito alto de potássio; desta forma, não foram realizadas reposições desse nutriente. A adubação de cobertura (80 kg ha^{-1} de N) foi aplicada quando as plantas apresentavam cinco folhas completamente expandidas.

A altura de plantas de sorgo foi mensurada aos 80 DAE e compreendeu a distância vertical entre o colo da planta e a bainha da última folha expandida. A área foliar foi quantificada aos 60 DAE, durante a floração da cultura, utilizando o equipamento LI-3000C, de forma direta e não destrutiva. O índice de área foliar das plantas foi obtido pela razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a área superficial de solo ocupada pela planta.

A colheita de grãos foi realizada no dia 31 de janeiro, aos 98 DAE, após a maturação fisiológica das plantas, em uma área útil de 4 m^2 , sendo colhidas as duas linhas centrais de cada unidade experimental, descartando-se $0,5 \text{ m}$ de cada extremidade. O rendimento de grãos da cultura (kg ha^{-1}) foi ajustado para 13% de umidade. Os componentes de rendimento: comprimento da panícula e número de panículas foram determinados no momento da colheita. A massa de grãos por panícula foi calculada pela razão entre o peso de grãos da parcela pelo número de panículas. A produtividade da água irrigada (WPI) foi determinada segundo a metodologia apresentada por RODRIGUES & PEREIRA (2009), em que WPI é obtida pela razão entre a produtividade de grãos e o total de água aplicada na irrigação.

A análise econômica da cultura do sorgo contemplou somente a receita (comercialização do grão) e o custo na aplicação de água por irrigação (custo com energia elétrica). Um detalhamento completo do sistema de produção (custos fixos e variáveis, custos operacionais e energéticos, valor de comercialização e receita) deve ser realizado para cada situação de produção e propriedade rural. Neste trabalho, detalhou-se somente o custo na aplicação da água, considerando similares os demais custos de produção para todos os tratamentos. O custo de energia elétrica ($\text{R\$ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) seguiu a proposta de LIMA et al. (2009), sendo o produto da energia consumida pelo sistema de irrigação ($\text{kWh mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) pelo número de horas de funcionamento do equipamento de irrigação e pelo custo médio da energia elétrica ($\text{R\$ kW h}^{-1}$). Os cálculos da análise econômica foram baseados em dados técnicos de um pivô com área de 108 hectares, motor com 300 cv, vazão de $0,104 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a lâmina bruta de $7,2 \text{ mm dia}^{-1}$ (lâmina em 21 horas) e consumo de energia dissipada específica de $6,6 \text{ kWh mm}^{-1}$, descrito por LIMA et al. (2009). A partir destes dados técnicos, determinou-se a quantidade de horas de funcionamento do sistema de irrigação para a aplicação da lâmina total de irrigação de cada tratamento. O custo médio da energia elétrica considerado foi de $0,145 \text{ R\$ kW h}^{-1}$, para tarifa horossazonal verde, durante o período seco (primavera – verão), fora do horário de ponta, cobrado pela empresa AES Sul, no ano de 2012 (ANEEL, 2012).

A receita total da cultura do sorgo foi obtida através do rendimento de grãos e o valor de comercialização. O valor de comercialização considerado foi de $\text{R\$ } 0,37 \text{ kg}^{-1}$, valor equivalente à média do preço pago ao produtor agrícola no mês de janeiro de 2013 (EMATER/ASCAR, 2013). A receita líquida obtida com os manejos de irrigação da cultura do sorgo corresponde à receita total subtraída do custo com a irrigação (neste caso, somente o custo da aplicação da água). O retorno econômico da irrigação compreendeu a relação entre a receita líquida e o custo da irrigação.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (Teste F, $p < 0,05$) e, quando os resultados eram significativos, as médias dos tratamentos foram comparadas através da análise de regressão, em nível de 5% de probabilidade de erro, utilizando o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das médias mensais das principais variáveis meteorológicas (temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa, precipitação e evapotranspiração de referência) estão apresentados na Tabela 1.

TABELA1. Resultados das médias mensais das temperaturas máxima, mínima e média, umidade relativa do ar (UR), precipitação pluvial (Precip. pluvial) e evapotranspiração de referência acumulada (ET_o ac.) registradas durante o período experimental. **Results of monthly average maximum temperature, minimum and average relative humidity (RH), rainfall (Precip. pluvial) and cumulative reference evapotranspiration (ET_o ac.) recorded during the field experiment.**

Mês	Temperatura			UR (%)	Precip. pluvial	ET _o ac.
	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Média (°C)		----- (mm) -----	-----
Outubro	21,6	20,7	21,2	78,9	22,0	24,4
Novembro	23,93	22,6	21,1	63,2	83,8	158,8
Dezembro	25,07	23,9	21,1	78,0	382,0	150,0
Janeiro	24,05	22,8	21,1	66,3	111,6	155,2

A temperatura média do ar durante todo o período de execução do experimento foi de 23,5 °C e a umidade relativa média do ar de 71%. A precipitação pluvial e a evapotranspiração de referência acumuladas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura foram de 600,2 e 488,0 mm, respectivamente. A precipitação pluvial acumulada para o mês de dezembro foi aproximadamente 300% superior à média histórica para a cidade de Santa Maria-RS, que é de 133,7 mm (HELDWEIN et al., 2009). Importante mencionar que as precipitações pluviais eram evitadas na área experimental, pois a mesma era protegida das precipitações pluviais com o uso de uma cobertura móvel. A presença do sistema de drenagem no entorno da área experimental evitou a entrada de água por fluxo lateral. A ocorrência da precipitação pluvial está apresentada, pois as mesmas, direta e indiretamente, interferem no microclima da área experimental.

O índice de área foliar e a altura das plantas aumentaram linearmente com o incremento de 25% para 100% na reposição da ET_c (Figura 1). A quantificação das respostas destas duas variáveis em função das irrigações deficitárias torna-se importante devido à influência dos mesmos sobre o rendimento da cultura.

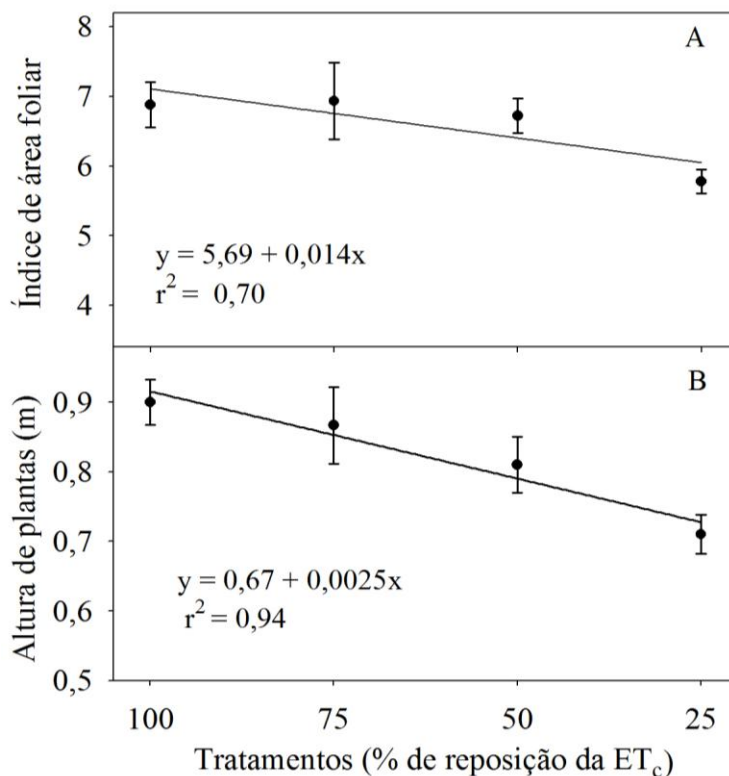


FIGURA 1. Índice de área foliar (A) e altura de plantas de sorgo (B) submetidas a diferentes manejos de irrigação deficitária. As barras verticais representam o desvio padrão da média. **Leaf area index (A) and plant height of sorghum plants (B) under different deficit irrigation management. The vertical bars indicate the average standard deviation.**

Segundo GODBHARLE et al. (2010), a cultura do sorgo apresenta uma correlação positiva entre a produtividade de grãos por planta e o índice de área foliar, indicando haver aumento na produtividade de grãos com o aumento no índice de área foliar. Avaliando a altura da planta podemos observar o desenvolvimento e o crescimento do colmo, que possui importante função de acúmulo de fotoassimilados (FREITAS et al. 2012).

Aos 60 DAE, estágio de desenvolvimento de floração, as plantas de sorgo do tratamento mantido com 100% da ET_c apresentaram índice de área foliar de 7,09, enquanto as plantas submetidas ao tratamento mantido com 25% da ET_c apresentaram índice de área foliar de 6,04 (Figura 1). Reduzindo-se a reposição de água para 25% da ET_c, o índice de área foliar máximo das plantas de sorgo foi reduzido em 5%. Um decréscimo no índice de área foliar máximo com o incremento da irrigação deficitária foi observado por FARRÉ & FACI (2006), sendo que a redução foi mais significativa no milho (158%) que no sorgo (34%) com a redução de 47% na reposição da ET_c.

As plantas do tratamento mantido com 100% da ET_c apresentaram altura de 0,92 m. A redução de 25% na reposição da ET_c provocou a redução de 0,06 m (7%) na altura das plantas de sorgo. HOWELL et al. (2007) não encontraram diferenças na altura de plantas e na produção de massa seca em plantas de sorgo com irrigação plena e com reposição de 50% da ET_c, porém diferenças entre o índice de área foliar foram observadas a partir de 90 dias após o plantio. Os resultados para altura das plantas de sorgo observados neste experimento são similares aos encontrados por MOREIRA (2011) para a cultura do sorgo sacarino.

O rendimento de grãos, a massa de grãos por panícula e o comprimento de panícula apresentaram resposta linear negativa com o incremento da irrigação deficitária (Figura 2). O maior rendimento de grãos (6.285,4 kg ha⁻¹) foi obtido com plantas mantidas com reposição de 100% da ET_c. Com a utilização de irrigação deficitária, cada de redução de 25% na aplicação de água na

reposição da ET_c resultou em diminuição de 1.113 kg ha^{-1} no rendimento de grãos das plantas de sorgo.

De acordo com KLOCKE et al. (2012), é difícil explicar diferentes respostas do rendimento de grãos à ET_c ao longo dos anos, porque podem ocorrer diferenças nas precipitações pluviais e na demanda evaporativa da atmosfera, resultando em diferenças no armazenamento inicial de água no solo. FARRÉ & FACI (2006) também verificaram, em experimento conduzido no norte da Espanha, que a utilização da irrigação deficitária em plantas de sorgo provocou reduções na produtividade de grãos, reduzindo de 8.540 kg ha^{-1} obtido com reposição de 100% para 640 kg ha^{-1} obtido com reposição de 20% da ET_c ; segundo os autores, a diferença elevada foi ocasionada devido à ocorrência das condições climáticas com poucas chuvas e elevada demanda evaporativa durante o ciclo de desenvolvimento.

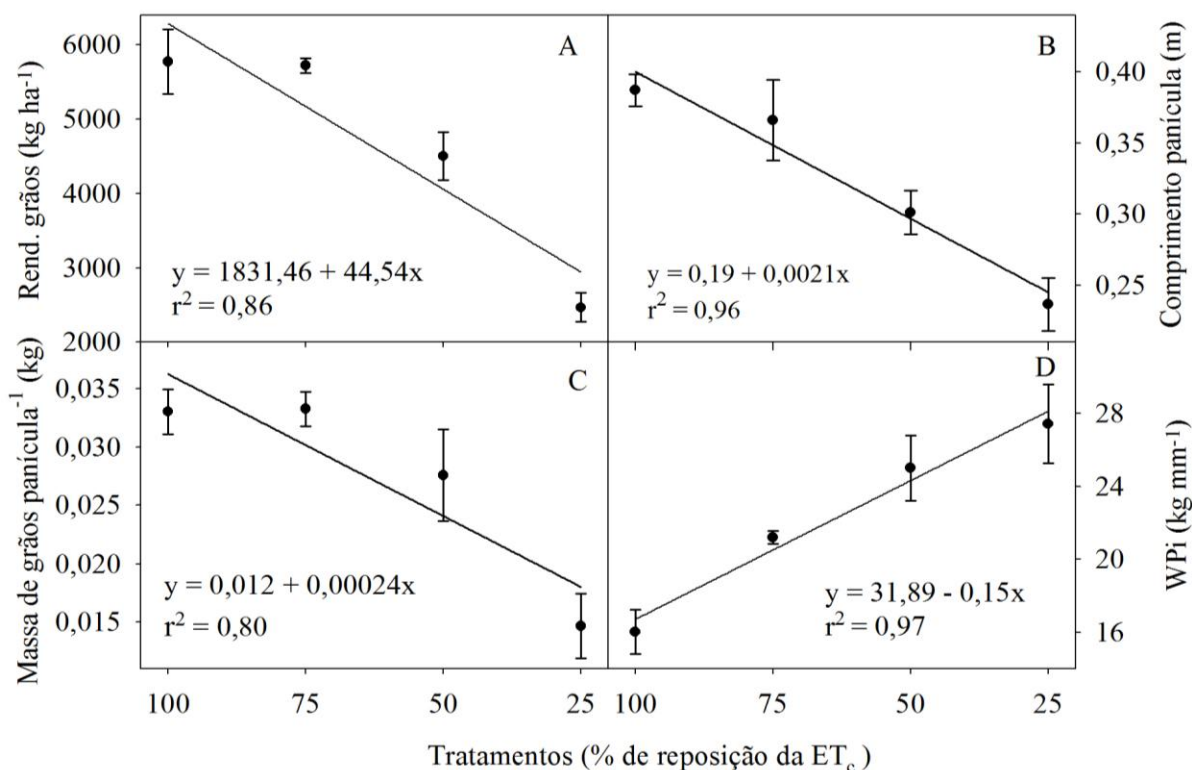


FIGURA 2. Rendimento de grãos (A), comprimento de panícula (B), massa de grãos por panícula (C) e produtividade da água irrigada (WPI) (D) na cultura do sorgo submetida a diferentes manejos de irrigação deficitária. As barras verticais representam o desvio padrão da média. **Grain yield (A), panicle length (B), grain weight per panicle (C) and productivity of irrigated water (WPI) (D) on sorghum crop submitted to different deficit irrigation management. The vertical bars indicate the average standard deviation.**

A maioria dos resultados reportados na literatura demonstram uma relação linear entre o rendimento de grãos e a ET_c (LAMM et al., 1994; TOLK & HOWELL, 2009; KLOCKE et al., 2010; KLOCKE et al., 2012; IGBADUN, 2012), sendo que, a não linearidade poderia ocorrer apenas se o índice de colheita (relação entre a biomassa de grãos e a biomassa total) variar em função do incremento do déficit hídrico no solo. Por outro lado, a resposta do rendimento à irrigação usualmente é quadrática, com diminuição do rendimento de grãos depois de alcançada a lâmina ótima de irrigação (KLOCKE et al., 2012).

O comprimento da panícula e a massa de grãos por panícula apresentaram resposta linear negativa em função do incremento da irrigação deficitária (Figuras 2B e 2C). Cada redução de 25% na ET_c , observou-se decréscimo de 0,05 m no comprimento médio das panículas e 0,006 kg na massa de grãos por panícula. A redução na massa de grãos por panícula é o resultado direto da

redução no comprimento da panícula, pois a redução no comprimento reduz o volume de grãos por panícula, acarretando menor massa de grãos (TOLK et al., 2013). GODBHARLE et al. (2010) afirmam haver uma correlação positiva entre o comprimento da panícula e a produção de grãos, e ainda apontam que essa pode ser uma importante característica para melhorar a produção de grãos por planta. ABDEL-MOTAGALLY (2010), trabalhando com sorgo sob diferentes lâminas de irrigação deficitária no Egito, verificou a redução de 0,04 m no comprimento de panícula com a redução na reposição de 100 para 50% da ET_c .

A WPI para grãos de sorgo apresentou uma resposta linear positiva em função do incremento da irrigação deficitária (Figura 2 D). A utilização da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição ET_c , incrementou em 11,25 kg mm⁻¹ (14%) a WPI na produção de grãos de sorgo. De acordo com BRITO et al. (2012), o aumento na produtividade da água pode ser uma resposta frente às dificuldades do problema ocasionado pela escassez hídrica. ALI & TALUKDER (2008) afirmam que o aumento da produtividade da água pode ser alcançado através de manejos de irrigação com reposição parcial da lâmina total necessária ou com a redução da frequência de irrigação. ARAYA et al. (2011) descrevem que a WPI pode ser utilizada para definir a quantidade suplementar de irrigação que se necessita aplicar em relação a uma irrigação plena ou precipitação, a fim de assegurar rendimento elevado em uma área total.

Os resultados observados neste trabalho demonstram que as irrigações deficitárias, com redução da lâmina irrigada, podem ser utilizadas para melhorar a WPI na produção de grãos da cultura do sorgo; porém, apesar do aumento da WPI, observou-se que o rendimento de grãos da cultura do sorgo foi muito reduzido, sendo que a redução de 75% na reposição da ET_c resultou no decréscimo de 51% na produtividade (Figura 2A). Os resultados obtidos com a WPI podem ser utilizados para a recomendação no manejo de irrigação de salvamento (irrigação estratégica), quando o produtor irrigante possui um baixo volume de água armazenada, possibilitando assim, a aplicação de uma lâmina mínima de irrigação à cultura.

O custo com a aplicação de água na irrigação foi de R\$ 991,08; R\$ 743,31; R\$ 495,54 e R\$ 247,77 nos tratamentos de irrigação deficitária com reposição de 100; 75; 50 e 25% da ET_c , para aplicações de lâminas de irrigação de 360; 270; 180 e 90 mm, respectivamente. Esse custo com a aplicação de água na irrigação refere-se ao custo da energia elétrica consumido pelo conjunto motobomba, visto que o custo de energia elétrica é considerado a variável mais importante no custo final da irrigação (TURCO et al., 2009).

A receita total, referente à comercialização do grão, obtida com a cultura do sorgo, apresentou resposta linear negativa em relação ao incremento da irrigação deficitária (Figura 3A). A maior receita total observada foi de R\$ 2.349,66, com reposição de 100% da ET_c . Cada redução de 25% na ET_c resulta na redução de R\$ 416,25 no valor da receita total.

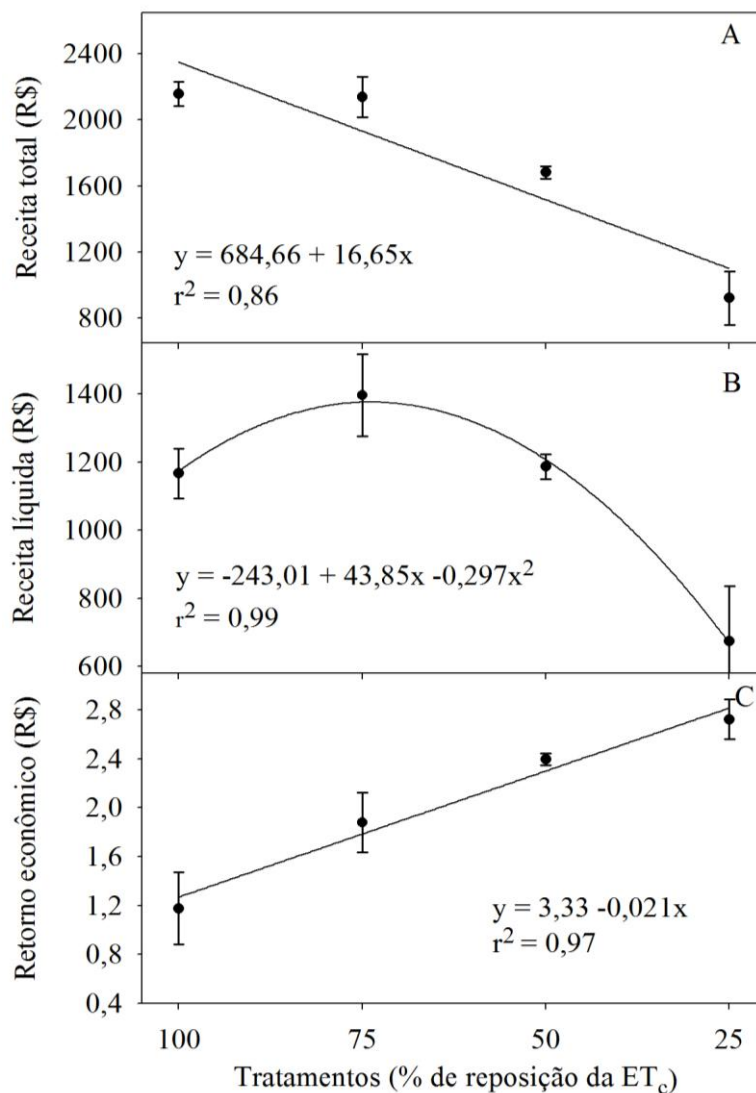


FIGURA 3. Resultado da receita total (A), receita líquida (B) e retorno econômico da irrigação (C) da cultura do sorgo submetida a diferentes manejos de irrigação deficitária. As barras verticais representam o desvio padrão da média. **Results of total revenue (A), net revenues (B) and economic returns of irrigation (C) of sorghum crop submitted to different deficit irrigation management. The vertical bars indicate the average standard deviation.**

A simulação de receita líquida da irrigação apresentou um comportamento quadrático em relação às irrigações deficitárias aplicadas de 25 a 100% da ET_c. A máxima eficiência econômica observada foi de R\$ 1.375,00 com a aplicação de irrigação deficitária de 75% da ET_c. A utilização da irrigação deficitária com reposição de 75% da ET_c, apresentou redução no rendimento de grãos; porém, mesmo assim, apresentou maior rendimento líquido devido ao menor custo com a irrigação.

A máxima eficiência econômica representa o maior ganho monetário da cultura, já descontados os custos. Esse parâmetro deve ser levado em consideração no momento da adoção de determinado manejo de irrigação, tanto na irrigação plena quanto na irrigação deficitária, quando a quantidade de água não for limitante. De acordo com LIMA JUNIOR et al. (2011), geralmente, devido ao sistema de irrigação apresentar elevados custos de operação e implantação, muitas vezes o máximo rendimento da cultura não corresponde à maior receita líquida. Desta forma, a lâmina de irrigação deve ser recomendada a fim de proporcionar a maior receita líquida. RODRIGUES et al. (2013), comparando o retorno econômico com a utilização de irrigação plena e irrigação deficitária impostas durante a fase de desenvolvimento vegetativo e maturação fisiológica na cultura do milho, para áreas de cultivo de 5 e 32 hectares, utilizando sistemas de irrigação por gotejamento e aspersão

(pivô central e aspersor setorial), verificaram que a viabilidade das estratégias de irrigação deficitária, para todos os cenários, é extremamente dependente dos preços de comercialização da produção. Ainda, de acordo com KLOCKE et al. (2012), a avaliação de manejos de irrigação alternativos começa pelo conhecimento das respostas dos cultivos à irrigação, sendo o rendimento de grãos e os preços dos commodities determinantes para a obtenção de retornos econômicos satisfatórios.

O retorno econômico sobre o custo na aplicação da água aumentou linearmente com a redução na reposição da ET_c de 100 para 25% (Figura 3 C). Cada redução de 25% na ET_c resulta em incremento de R\$ 0,56 (20%) no retorno econômico sobre o custo com a aplicação de água. Em plantas mantidas com 25% da ET_c , cada R\$ 1,00 investido com a aplicação da água, proporcionou o retorno de R\$ 2,80, representando o manejo com maior retorno econômico. Porém, observa-se que, no manejo de irrigação deficitária com somente 25% de reposição da ET_c , a receita líquida obtida foi menor que a obtida nos demais tratamentos (Figura 3 B), resultado da baixa produtividade de grãos apresentada pelas plantas do tratamento mantido com 25% da ET_c . Dessa forma, adotando a recomendação com base na máxima eficiência econômica (receita líquida), neste trabalho, a irrigação deficitária com reposição de 75% da ET_c resultou no retorno econômico de R\$ 1,75 para cada R\$ 1,00 investido com a aplicação de água. Em trabalho realizado por MARTINS et al. (2012), com silagem de plantas de milho submetidas aos manejos de irrigação plena (100% ET_c), de irrigação deficitária com déficit hídrico leve (75% ET_c) e de irrigação deficitária com déficit hídrico moderado (50% ET_c), os autores verificaram que o retorno econômico alcançado com as irrigações deficitárias, na produção de silagem de milho, foi maior que o observado com a irrigação plena.

CONCLUSÕES

A utilização da irrigação deficitária, variando de 100% para 25% da reposição da evapotranspiração da cultura (ET_c), provocou redução linear na altura, no índice de área foliar e no rendimento de grãos das plantas de sorgo, cultivadas em Santa Maria-RS, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico. A cada decréscimo de 25% na reposição da ET_c , as plantas de sorgo reduziram em 7% a altura das plantas, em 5% o índice de área foliar e em 17% o rendimento de grãos.

A utilização da irrigação deficitária proporcionou incremento linear na produtividade da água irrigada e no retorno econômico sobre o custo com a aplicação de água. Cada redução de 25% na reposição da ET_c aumentou em 14% a produtividade da água irrigada e em 20% o retorno econômico sobre o custo com a aplicação de água.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-MOTAGALLY, F. M. F. Evaluation of water use efficient under different water regimes in grain sorghum (*Sorghum bicolor*, L. monech), **World Journal of Agricultural Sciences**, v.6, n.5, p.499-505, 2010.
- ALBUQUERQUE, C. J. B.; MENDES, M. C. Época de semeadura do sorgo forrageiro em duas localidades do estado de Minas Gerais, **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.4, n.1 p.116-125. jan/abr 2011.
- ALBUQUERQUE, C. J. B.; ROCHA, G. R.; BRANT, R.S.; MENDES, M. C. Espaçamento reduzido para o cultivo do sorgo granífero no sistema irrigado e em sequeiro, **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.3, n.2, p.1-16, mai./ago. 2010.
- ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.95n.11, p. 1201–1213, nov. 2008.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 56. 1998.

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 1.280, DE 17 DE ABRIL DE 2012. Homologa as tarifas de fornecimento de energia elétrica e as Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição, **Diário oficial da união, Brasília, DF, 20 de abr. 2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/pubreh20121280.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2013.
- ARAYA, A.; STROOSNIJDER, L.; GIRMAY, G.; KEESSTRA, S. D. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.), **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.98, n. 5, p.775-783, mar. 2011.
- BASSO, F. C.; ANDREOTTI, M.; CAVALHO, M. P.; LODO, B. N. Relações entre produtividade de sorgo forrageiro e atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo do cerrado, **Pesquisa. Agropecuaria Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 135-144, jan./mar. 2011.
- BAUMHARDT, R. L.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A.; ROSENTHAL, W. D. Sorghum Management Practices Suited to Varying Irrigation Strategies: A Simulation Analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v.99, p.665-672, 2007.
- BRITO, L. T.; CAVALCANTI, N. B.; SILVA, A. S.; PEREIRA, L. A. Produtividade da água de chuva em culturas de subsistência no semiárido pernambucano, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.102-109, jan./fev. 2012.
- CQFS-RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.
- DU, T.; KANG, S.; SUN, J.; ZHANG, X.; ZHANG, J. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n.1, p. 66–74, jan. 2010.
- DUARTE, J. O. **Cultivo do sorgo: mercado e comercialização**. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo/mercado.htm>> Acesso em: 17 set. 2012.
- EMATER/ASCAR - ASSOCIAÇÃO RIOGRANDENSE DE EMPREENDIMENTOS DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. **Acompanhamento de preços recebidos pelos produtores do Rio Grande do Sul**. 2013. (Boletim Informativo, 1741). Disponível em: <https://intranet.emater.tche.br/intranet/sistemas/sispreco/php/relatorios/relatorio_precos_semanais_recebidos2.php> Acesso em: 20 fev. 2013.
- ENGLISH, M. J. A paradigm shift in irrigation management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**: ASCE, New York, v.128, n.5, p.267-277, 2002.
- FAGGION, F.; OLIVEIRA, C. A. S.; CHRISTOFIDIS, D. Uso eficiente da água: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável da agropecuária, **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.2, n.1, p.187-190, jan./abr. 2009.
- FARRÉ, I.; FACI, J. M. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.83, p.135–143, may. 2006.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.
- FREITAS, G. A.; SOUSA, C. R.; CAPONE, A.; AFFÉRI, F. S.; MELO, A. V.; SILVA, R. R. Adubação orgânica no sulco de plantio e sua influência no desenvolvimento do sorgo. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Tocantins, v. 3, v. 1: p. 61-67, feb, 2012.

- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.96, n.9, p.1275–1284, sep. 2009.
- GODBHARLE, A. R.; MORE, A.W.; AMBEKAR, S. S. Genetic variability and correlation studies in elite ‘B’ and ‘R’ lines in kharif sorghum. **Electronic Journal of Plant Breeding**, Tamil Nadu, v.1, n.4, p. 989-993, jul. 2010.
- HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria, **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.1, n.38, p.43-58, jan./jun. 2009.
- HOWELL, T. A. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 281-289, 2001.
- HOWELL, T. A.; TOLK, J. A.; EVETT, S. R.; COPELAND, K. S.; DUSEK, D. A. Evapotranspiration of deficit irrigated sorghum. World Environmental and Water Resources Congress, Reston, p.1-10, 2007. **Proceedings...**
- IGBADUN, H. E. Impact of methods of administering growth-stage deficit irrigation on yield and soil water balance of a maize crop (SAMAS TZEE). **Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences**, Sokoto, v. 20, n. 4. p. 357-367, dec. 2012.
- KLOCKE, N. L.; CURRIE, R. S.; TOMSICEK, D. J.; KOEHN, J. W. Sorghum yield response to deficit irrigation. **Transaction of the ASABE**, St. Joseph, v.55, n.3, p.947-955, 2012.
- KLOCKE, N. L.; CURRIE, R. S.; STONE, L. R.; BOLTON, D. A. Planning for deficit irrigation, **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph v.26, n.3. p. 405 - 412, feb. 2010.
- LAMM, F. R.; ROGERS, D. H.; MANGES, H. L. Irrigation scheduling with planned soil water depletion. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p. 1491-1497, 1994.
- LIMA JUNIOR, J. A.; PEREIRA, G. M.; GEISENHOF, L. O.; COSTA, G. G.; REIS R. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Avaliação econômica da produção de alface americana em função de lâminas de irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, lavras v.35, n.2, p. 392-398. 2011.
- LIMA, A. J.; GUIMARÃES J. R, S. C.; FIETZ, C. R.; CAMACHO. J. R. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.499–505, jul./ago. 2009.
- LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; MATEOS, L.; FERNANDEZ, M. S. Estimativa da produtividade de água em uma área irrigada no sul da Espanha, **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.6, n.1, p.51–60, 2012.
- MARTINS, J. D.; CARLESSO, R.; AIRES, N. P.; GATTO, J. C.; DUBOU, V.; FRIES, H. M.; SCHEIBLER, R. B.; Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho, **Irriga**, Botucatu, p.192 - 205, 2012. Edição especial.
- MOREIRA, L. R. **Caracterização morfofisiológica de cultivares de sorgo sacarino em estresse hídrico**. 2011. 89f. Tese (Doutorado em fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. Secretaria de Agricultura, 1961. 42p.
- PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.108, p. 39–51, 2012.
- RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; GONÇALVES, J. M.; ALVES, I; PEREIRA, L. S. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 126, p. 85–96, aug. 2013.

RODRIGUES, G. C.; PEREIRA, L. S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs, **Biosystems engineering**, Kidlington, v.103, n.4, p. 536–551, aug. 2009.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SINGH, A.; PANDA, S. N. Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 115, p. 267–275, Dec. 2012.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A.; MILLER, F. R. Yield component analysis of grain sorghum grown under water stress, **Field Crops Research**, Amsterdam, v.145, p.44-51, 2013.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Transpiration and Yield Relationships of Grain Sorghum Grown in a Field Environment, **Agronomy Journal**, Madison, v.101, n.3, p.657-662, 2009.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. S.; PAVANI, L. C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2, p. 311-320, apr./jun. 2009.