

PRODUTIVIDADE DO MILHO IRRIGADO NA REGIÃO DO ARENITO CAIUÁ NO NOROESTE DO PARANÁ

GIULIANI DO PRADO¹; ADRIANO CATOSI TINOS¹; DENISE MAHL¹ E RAFAEL DE ALMEIDA SCHIAVON¹

¹ Departamento de Engenharia Agrícola - DEA, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Rodovia PR 482, km 45, CEP: 87.820-000, Cidade Gaúcha-PR, Brasil. E-mail: gprado@uem.br, actinos@uem.br, demahl@gmail.com, raschiavon@gmail.com.

1 RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na Universidade Estadual de Maringá, em Cidade Gaúcha/PR, e objetivou avaliar a produtividade da variedade de milho IPR-164, em diferentes sistemas de cultivo e lâminas de irrigação. O experimento, conduzido entre 01/10/2019 a 10/02/2020, foi estabelecido em faixas, com parcelas subdivididas, quatro repetições e dois tratamentos (sistemas de cultivo e lâminas de irrigação). Nas parcelas, os sistemas de cultivo foram: semeadura convencional e semeadura direta. Nas subparcelas, as lâminas de irrigação (percentual da lâmina líquida - % I_L) foram: 0, 30, 63, 100 e 193%. Após a colheita, a produtividade de espigas (com e sem palha) e de grãos na umidade de 20,5 e 13% foram avaliadas. Os resultados mostraram que: 1) o sistema de cultivo não influenciou na produtividade; 2) a produtividade respondeu de forma quadrática às lâminas de irrigação; 3) lâminas próximas a 100% da I_L resultaram em produtividades máximas e; 4) a sensibilidade ao déficit hídrico promoveu decréscimos de 20,4% na produtividade. Quando o custo do milímetro de água for 10 vezes maior que o custo do quilograma do milho (umidade 13%), economicamente é mais viável produzir 7.957 kg ha⁻¹ com 60% da I_L do que alcançar a produtividade máxima (8.283 kg ha⁻¹).

Palavras-chave: lâminas de irrigação, sistemas de cultivo, déficit hídrico.

PRADO, G.; TINOS, A. C.; MAHL, D.; SCHIAVON, R. A.
IRRIGATED CORN YIELD AT THE ARENITO CAIUÁ REGION IN NORTHWEST OF PARANÁ STATE, BRAZIL

2 ABSTRACT

This work was performed at Universidade Estadual de Maringá, in Cidade Gaúcha/PR city, Brazil, and aimed to evaluate the corn variety IPR-164 yield, in different tillage systems and irrigation depths. The experiment, carried out from 10/01/2019 to 10/02/2020, was set in strips design, with subdivided plots, four replications, and two treatments (tillage systems and irrigation depths). In the plots, the tillage systems were: conventional-tillage and no-tillage. In the subplots, the irrigation depths (percentage of the net irrigation depth - %NID), were: 0, 30, 63, 100, and 193%. After harvesting, the data corn ear yield (in-husk and unhusked) and the grain yield with the moisture of 20.5 and 13% were evaluated. The results showed that: 1) the tillage system did not influence the corn yield; 2) corn yield presented a quadratic response to

the irrigation depths; 3) irrigation depths close to 100% of NID provided maximum yield; 4) the sensitivity to water deficit led to a 20.4% decrease in corn yield. When the millimeter water cost is 10 times greater than the corn kilogram cost (moisture 13%), it is economically more profitable to produce 7,957 kg ha⁻¹ with 60% of NID than to reach the maximum yield (8,283 kg ha⁻¹).

Keywords: irrigation depths, tillage systems, water deficit.

3 INTRODUÇÃO

A região do Arenito Caiuá, constituída de solos que podem ter até 85% de areia (grossa e fina) em sua granulometria, apresenta uma extensão de terra de 3,2 milhões de hectares que representam uma área de 16% do estado do Paraná (FIDALSKI et al., 2013). Conforme Silva et al. (2019), devido a predominância de macroporos, os solos de textura arenosa são usualmente bem drenados, mas em contrapartida apresentam baixa fertilidade natural, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes e reduzida estabilidade de agregados, o que os tornam altamente susceptível a erosão.

Nesse sentido, sistemas de manejo conservacionistas e sustentáveis, que visam melhorar a qualidade e reduzir as perdas de solo se fazem necessários (BORGES et al., 2015; KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2019). Segundo Telles et al. (2019), o sistema de plantio direto, que se caracteriza pelo cultivo sobre a palhada de culturas anteriores e o mínimo revolvimento do solo, vem sendo utilizado no Brasil, principalmente, para reduzir as perdas de solo por erosão. Essa prática associada à rotação de culturas também influencia, no curto prazo, a produtividade das culturas, devido a alterações na disponibilidade de água e nitrogênio no solo, e, no longo prazo, afetando a quantidade de matéria orgânica no solo (AL-KAISI et al., 2015).

Conforme o zoneamento agrícola (INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ, 2020) estabelecido para o

Noroeste do Paraná, a semeadura do milho é recomendada entre os meses de setembro a novembro, dependendo da precocidade da variedade ou do híbrido adotado. No cultivo de milho em sistema de plantio direto com rotações de culturas nos anos de 2014/15 e 2015/16 na região do Arenito Caiuá, Volsi et al. (2020) observaram, nos diferentes tratamentos de rotação de culturas, produtividades de milho entre 8.014 a 8.324 kg ha⁻¹. Contudo, regionalmente tem sido constatado que a adoção de práticas de manejo e fertilidade nesses solos, às vezes, não corresponde à expectativa da produção esperada, provavelmente por razões ligadas à sua limitada disponibilidade hídrica (FIDALSKI et al., 2013).

A adoção de um sistema de irrigação para suplementação de água, certamente, promove um incremento produtivo das culturas. Entretanto, na aquisição do sistema da irrigação, esse incremento produtivo deve pagar o investimento e para tanto são necessários dados comparativos de produção das culturas em condição de irrigação e sequeiro. Conte et al. (2009), ao avaliar a produção de milho irrigado e não irrigado sob diferentes níveis de cobertura do solo de textura arenosa, observaram, respectivamente, produtividades de grãos de 8.351 e 3.612 kg ha⁻¹, que representa uma diferença de 56,7%.

O conhecimento da resposta produtiva das culturas a lâminas de irrigação (curva de resposta) é essencial quando o interesse é maximizar os lucros, principalmente, em cenários onde os custos de água e energia são elevados e a irrigação

com déficit hídrico se torna necessário (MARTINS et al., 2016). Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar a resposta produtiva da cultura do milho em um solo arenoso do Noroeste do Paraná, submetida a diferentes lâminas de irrigação e cultivada em semeadura direta e em solo mobilizado convencionalmente.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar a produtividade da variedade de milho (*Zea mays* L.) IAPAR IPR-164 sob condições de irrigação, em sistema de cultivo convencional (mobilização do solo com aração e gradagem) e em semeadura direta, na região do Arenito Caiuá, no Noroeste do Paraná, foi conduzido um experimento no período de 01/10/2019 a 10/02/2020. Esse experimento foi implantado no Campus do Arenito, da Universidade Estadual de Maringá, em Cidade Gaúcha, Paraná, que apresenta altitude média de 404 m e coordenadas geográficas de 23°22'30"S e 52°56'00"O. Conforme classificação de Köppen (BISCARO, 2007), o clima da região é subtropical úmido mesotérmico, apresenta verões quentes com tendência de concentração das chuvas, temperatura anual média de 22 °C, invernos com geadas pouco frequentes e sem estação seca definida.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa (EMBRAPA, 2013), com 83% de areia (fina e grossa) na camada de 0 a 0,20 m (MIOTO et al., 2016). A caracterização química do solo antes da implantação do experimento, para a camada de 0 a 0,20 m, foi realizada em laboratório de solos, cujos valores foram os seguintes: pH em água = 5,60; pH em CaCl₂ = 4,90; H + Al = 2,74 cmol_c dm⁻³ (método SMP); Al³⁺ = 0,00 cmol_c dm⁻³, Ca²⁺ = 1,45 cmol_c dm⁻³, Mg²⁺ = 0,48 cmol_c dm⁻³ (extraídos por KCl 1 mol L⁻¹); K⁺ =

0,19 cmol_c dm⁻³, P = 7,82 mg dm⁻³ (extraídos por Mehlich 1); C = 7,78 g dm⁻³ (método Walkley e Black).

Segundo o manual de adubação do Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR (OLIVEIRA, 2003), para o milho é recomendável uma saturação de bases do solo igual a 70%. Dessa maneira, quatro meses antes da implantação do experimento, no mês de junho de 2019, para a camada de 0 a 0,20 m foi aplicada e incorporada ao solo (com aração e gradagem) uma dose de calcário dolomítico (PRNT 75%) de 1.712 kg ha⁻¹.

Com o intuito de proporcionar adubação verde e cobertura do solo, respectivamente, para os sistemas de cultivo convencional (em solo mobilizado com aração e gradagem) e semeadura direta, um dia após a calagem foi semeada a lanço, com distribuidor de corretivos centrífugo, a cultura de inverno aveia preta (*Avena strigosa*), na densidade de 80 kg ha⁻¹. Durante o desenvolvimento da aveia preta foi realizada uma aplicação de nitrogênio na dosagem de 60 kg ha⁻¹ (OLIVEIRA, 2003), tendo como fonte de nitrogênio a ureia (45% de N).

No começo do mês de setembro, com o início da floração da aveia preta, foi realizada a aplicação do herbicida glifosato para a dessecação dessa cultura. Duas semanas após a dessecação da vegetação, metade da área foi mobilizada até a profundidade de 0,20 m com arado de discos e grade niveladora e, a outra metade da área foi destinada à semeadura direta. Na área de semeadura direta, com auxílio de um gabarito de um metro quadrado, foram retiradas duas amostras do material dessecado, as quais após serem mantidas em estufa de circulação de ar por 72 h a 65°C apresentaram uma massa seca média de 1.742 kg ha⁻¹.

No início do mês de outubro (01/10/2019) foi realizada a semeadura do milho com uma semeadora-adubadora de arrasto, com dosadores de discos

triangular (PRADO, 2016), a lâmina líquida (I_L) de irrigação para elevar o solo a capacidade de campo foi definida como o tratamento I3 ($I3 = 100\%$ da I_L). Assim, a partir do tratamento I3 foram definidos os tratamentos com menores níveis de irrigação ($I0 = 0\%$; $I1 = 30\%$ e; $I2 = 63\%$ da I_L) e um com maior nível de irrigação ($I4 = 193\%$ da I_L).

O manejo da irrigação adotado foi o via clima, sendo os dados meteorológicos coletados diariamente na estação do

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 50 m da área experimental. De acordo com Allen et al. (1998), os dados meteorológicos de radiação solar incidente (Q_g), temperatura mínima (T_{min}), média (T_m) e máxima (T_{max}), velocidade do vento a 2 m de altura do solo (u_2) e umidade relativa (UR), podem ser empregados para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0), com a equação de Penman-Monteith, dada por:

$$ET_0 = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_0 - evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n - saldo de radiação na superfície de cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G - fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T_m - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s - pressão de vapor na saturação (kPa); e_a - pressão de vapor atual (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor na saturação *versus* temperatura do ar ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), e; γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Para o cálculo dos parâmetros que compõem a Eq. 1, foi empregada a metodologia e os procedimentos de cálculos

descritos no capítulo 3 do manual 56 da FAO (ALLEN et al., 1998), considerando um fluxo de calor no solo igual a zero. Conforme esse manual, no cálculo da ET_0 para períodos diários, o fluxo de calor no solo pode ser negligenciado ($G = 0$).

Os valores de coeficiente de cultivo (K_c) (ALLEN et al., 1998), dados pela Eq. 2, foram utilizados para calcular a evapotranspiração potencial da cultura ($ET_{pc} = ET_0 \times K_c$) e os valores do coeficiente de umidade do solo (k_s), calculados pela Eq. 3 (BERNARDO et al., 2019), foram empregados para calcular a evapotranspiração da cultura ($ET_c = ET_{pc} \times k_s$).

$$K_c = \begin{cases} K_c \leftarrow 0,5 & \text{Se: } DAE \leq 20 \\ K_c \leftarrow 0,5 + \frac{[0,7(DAE - 20)]}{35} & \text{Se: } 20 < DAE < 55 \\ K_c \leftarrow 1,2 & \text{Se: } 55 \leq DAE \leq 95 \\ K_c \leftarrow 1,2 - \frac{[0,3(DAE - 95)]}{30} & \text{Se: } 55 < DAE \leq 125 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_s = \begin{cases} k_s \leftarrow \frac{\ln(L_{AA} + 1)}{\ln(L_{CC} + 1)} & \text{Se: } L_{PM} \leq L_{AA} \leq L_{CC} \\ k_s \leftarrow -1 & \text{Se: } L_{CC} < L_{AA} \leq L_{Sat} \\ k_s \leftarrow 0 & \text{Se: } L_{AA} \leq L_{PM} \end{cases} \quad (3)$$

Em que: Kc - coeficiente de cultivo (decimal); DAE - corresponde ao número de dias após a emergência da cultura (dia); ks - coeficiente de umidade no solo (decimal); L_{AA} - lâmina atual de água no solo (mm); L_{CC} - lâmina de água no solo em capacidade de campo (mm); L_{Sat} - lâmina de água no solo em saturação (mm), e; L_{PM} - lâmina de água no solo em ponto de murcha (mm).

No balanço hídrico para o manejo da irrigação, os dados de umidade do solo em saturação (0,311 m³ m⁻³), capacidade de campo (0,196 m³ m⁻³) e ponto de murcha (0,066 m³ m⁻³) foram determinados na curva de retenção de água no solo, ajustada ao modelo de Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), respectivamente, para as tensões de água no solo de 0, 6 e 1.500 kPa. A profundidade efetiva do sistema radicular foi definida como 0,5 m e o fator de disponibilidade de água no solo (f) como 40%. Desta maneira, a lâmina líquida de irrigação para elevar o solo a capacidade de campo (tratamento I3), representou o somatório da ETc menos a precipitação efetiva coletada na área experimental.

O valor da lâmina líquida, para turnos de rega variáveis, foi aplicado integralmente no tratamento I3, que serviu como referência para o controle da irrigação. No controle das lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos, as quantidades de água aplicadas foram mensuradas em coletores de 0,08 m de diâmetro, instalados a uma altura de 2,1 m da superfície do solo. Conforme a Figura 1, duas linhas de coletores, posicionadas

transversalmente ao sentido das faixas experimentais, foram utilizadas para determinar a lâmina aplicada em cada tratamento.

Durante a condução do experimento, no 25º dia após a semeadura foi realizada, para o controle de ervas daninhas, capina e arranquio manual, respectivamente, na área de cultivo convencional e semeadura direta. Para o controle da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), no 33º dia após a semeadura foi realizada uma aplicação de inseticida do grupo químico piretróide, com pulverizador costal, na dose de 65 mL ha⁻¹ e volume de calda de 300 L ha⁻¹.

A colheita das espigas de milho foi realizada no 133º dia após a semeadura (10/02/2020), nas duas linhas centrais de cada parcela, correspondendo a uma área de 5,4 m² (1,8 x 3,0 m). As amostras foram encaminhadas ao laboratório, onde foram determinadas as massas das espigas (com e sem palha) e a massa de grãos para a obtenção da produtividade da cultura.

Duas amostras de grãos de cada unidade experimental foram retiradas e levadas à estufa de circulação de ar, por 24 horas a 105 °C, para a determinação da umidade da massa de grãos em base úmida. Os valores de umidade foram empregados para estimar a produtividade de grãos para a umidade em base úmida a 13% (CRUZ et al., 2009).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de significância pelo teste de F. Constatadas diferenças significativas, aos dados quantitativos foi aplicada a análise de regressão e aos dados qualitativos foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey, ambos a

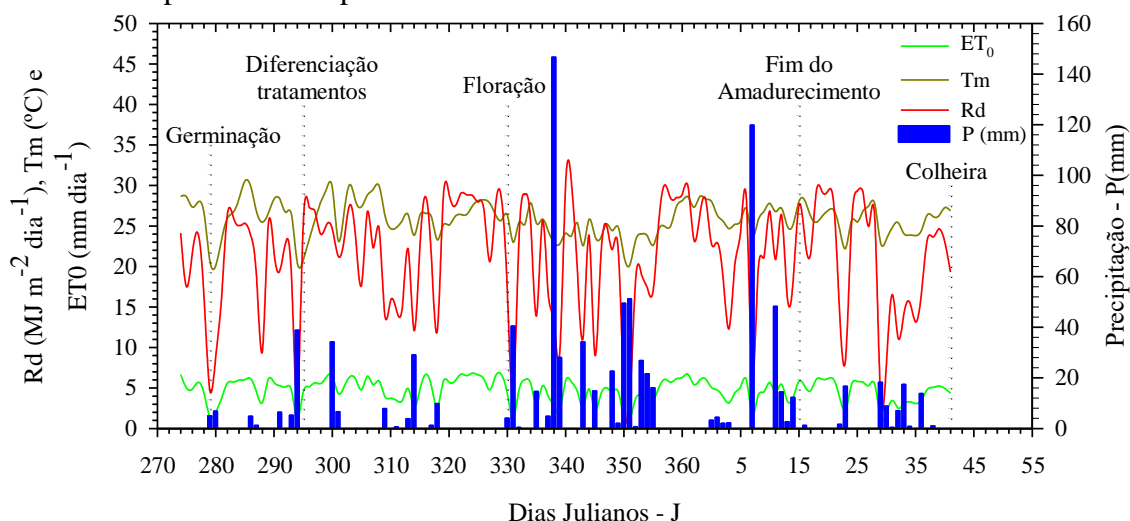
5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Software SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os dados diários dos elementos meteorológicos (evapotranspiração de referência - ET_0 , temperatura média - T_m , radiação incidente - R_d e precipitação - P) observados durante a condução do experimento. Como o trabalho foi conduzido ao longo da primavera e do verão, há uma tendência dos

valores de temperatura e radiação solar aumentarem. Entretanto, devido aos eventos de precipitação pluviométrica, houve picos de redução nos valores dessas variáveis meteorológicas (Figura 2), que durante o período apresentaram amplitudes máximas de 20,1 a 30,5 °C e de 3,1 a 30,3 $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$. Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), em função da nebulosidade, os valores de radiação solar incidente podem variar entre 4 e 35 $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$, que equivalem a valores entre 10 e 80% da radiação solar que chega no topo da atmosfera.

Figura 2. Variação dos elementos meteorológicos: temperatura média (T_m), radiação incidente (R_d), precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_0), ao longo do período do experimento.



Os valores de ET_0 , calculados pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) apresentaram variação entre 1,0 a 6,8 $mm\ dia^{-1}$ ao longo do ciclo da cultura (Figura 2). Conforme Silva et al. (2018) e Ganji e Kajisa (2019), para o cálculo da ET_0 são necessários os elementos meteorológicos: radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e pressão de vapor, sendo a radiação solar, o elemento mais relevante no cálculo. Dessa forma, é possível observar na Figura 2, que o comportamento temporal dos valores de

ET_0 é semelhante aos da radiação solar incidente.

No período compreendido entre 01/10/2019 e 10/02/2020 ocorreu uma precipitação total de chuvas de 937 mm, com dois eventos de chuva diária iguais a 147 e 120 mm (Figura 2). Considerando que o total anual de chuvas esperado para o noroeste do Paraná é de 1.500 mm (SANTOS et al., 2017), o quantitativo de chuva observado nos 133 dias de experimento foi elevado. Contudo, essas chuvas foram concentradas e em 39% do

tempo ocorreram em intervalos entre 5 a 10 dias, o que para solos de textura arenosa pode ocasionar déficit hídrico. Bortoluzzi et al. (2019), ao analisar as precipitações mensais prováveis para o noroeste do Paraná, observaram que entre os meses de outubro a março ocorrem os maiores índices pluviométricos, mas que a ocorrência de déficit hídrico não deve ser negligenciada.

Para suprir o déficit hídrico entre os intervalos de ausência de chuvas (5 a 10 dias) foram realizadas irrigações cujos valores de lâminas aplicadas, para os tratamentos, são apresentados na Tabela 1. No tratamento I3, referência para o manejo da irrigação ao longo de 12 eventos de irrigação foi aplicado 171 mm de água, sendo que os demais tratamentos receberam valores percentuais desta lâmina I3.

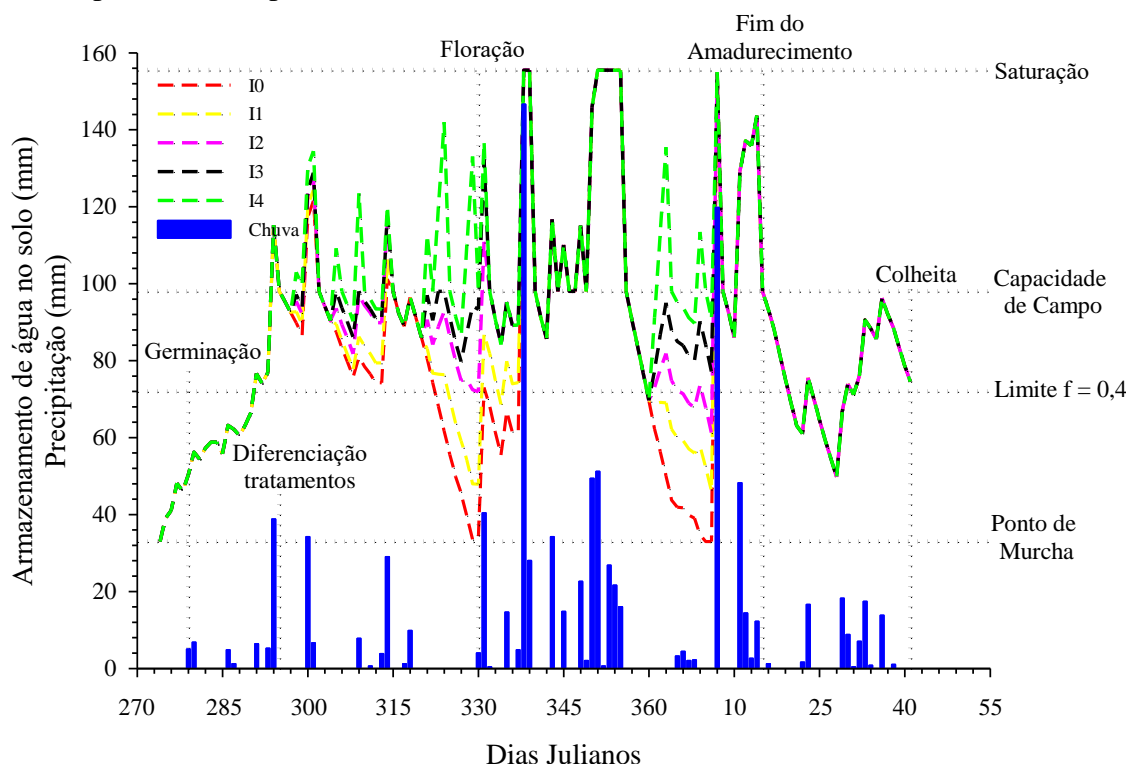
Tabela 1. Valores de irrigação para os tratamentos de lâminas de irrigação durante o experimento.

Lâminas de irrigação – I		
Tratamentos	Total (mm)	Percentual da I _L ou I3 (%)
I0	0	0
I1	51	30
I2	108	63
I3	171	100
I4	329	193

Na Figura 3 é apresentada para os tratamentos de lâminas de irrigação, a estimativa do armazenamento de água no solo (ARM) na camada de 0 a 0,50 m. A partir da semeadura foram realizadas irrigações em toda a área experimental para elevar a umidade do solo, favorecer a

germinação e o desenvolvimento inicial da cultura. Nesse período de vinte e dois dias, entre a germinação até a diferenciação dos tratamentos, também ocorreram chuvas, que totalizaram 68 mm e contribuíram para elevar o solo à capacidade de campo (Figura 3).

Figura 3. Estimativa do armazenamento de água no solo, na profundidade efetiva do sistema radicular, para os tratamentos de lâminas de irrigação e precipitação ocorrida no período do experimento.



No período compreendido entre a diferenciação dos tratamentos até o fim do amadurecimento (Figura 3), os valores de ARM do tratamento I3 permaneceram grande parte do tempo entre a capacidade de campo e o valor crítico do fator de disponibilidade de água no solo, sendo que houve exceções na ocorrência de elevadas lâminas de chuvas, quando o ARM superou o valor da lâmina em capacidade de campo. Nos tratamentos I0, I1 e I2, com lâminas aplicadas aquém da demanda hídrica da cultura, houve momentos em que o ARM permaneceu entre os limites de ponto de murcha e o valor crítico do fator de disponibilidade de água no solo (Figura 3). No tratamento I4, onde a lâmina foi de 193% da demanda hídrica da cultura, em grande parte do tempo, os valores de ARM ficaram compreendidos entre os limites de lâmina em capacidade de campo e saturação de água no solo (Figura 3).

De acordo com Martins et al. (2016), a menor disponibilidade de água no solo causada por irrigações deficitárias não potencializa a evapotranspiração da cultura e pode levar a uma redução da produtividade da cultura. Já lâminas de água que excedem a umidade em capacidade de campo do solo, promovem percolação de água e lixiviação de nutrientes, resultando também em redução na produtividade das plantas (ANTONIEL et al., 2016).

As variáveis respostas massa de espigas (com e sem palha) e massa de grãos ($U_{bu} = 20,5$ e 13%) não apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$) entre os sistemas de cultivo com mobilização convencional do solo e semeadura direta (Tabela 2). Em média, a massa de espigas com e sem palha e a massa de grãos de milho à umidade de 20,5%, respectivamente, apresentaram valores de 1,54; 1,39 e 1,10 vezes maiores

que a massa de grãos na umidade de 13%. Conforme Cruz et al. (2009), a umidade de colheita do milho situa-se na faixa de 18 a

20% e a umidade de secagem para o armazenamento deve ser próxima a 13%.

Tabela 2. Massa de espigas e de grãos de milho, em umidade de base úmida (U_{bu}), em função do tipo de cultivo.

Sistema de cultivo	Massa de espigas (kg ha^{-1})		Massa de grãos (kg ha^{-1})	
	Com palha	Sem palha	$U_{bu} = 20,5\%$	$U_{bu} = 13\%$
Convencional	11.050 a*	9.956 a	7.866 a	7.223 a
Direto	11.006 a	9.931 a	7.834 a	7.144 a

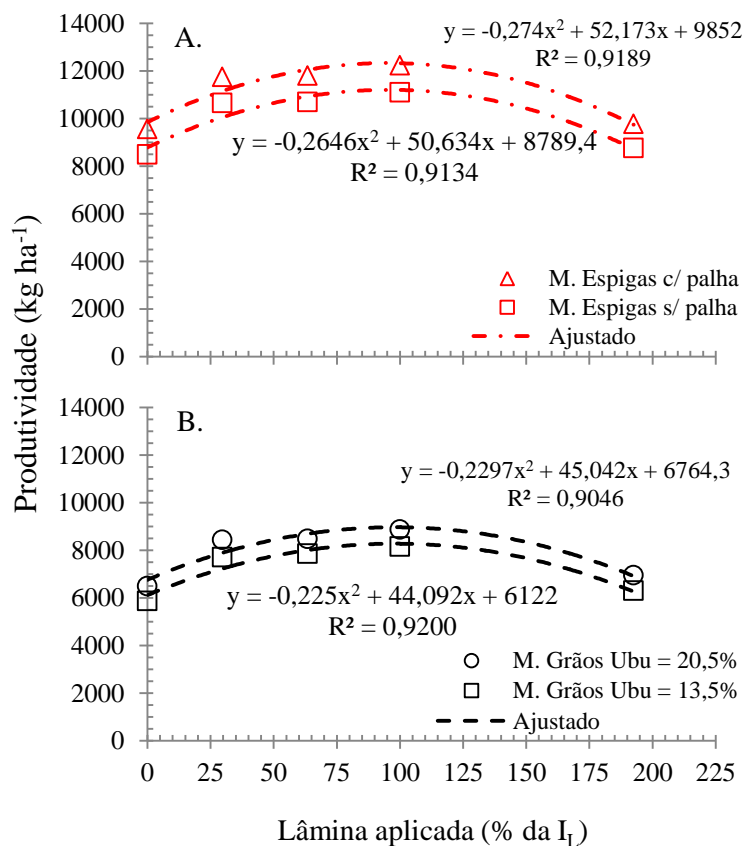
* Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em termos de produtividade do milho, a superioridade do sistema semeadura direta muitas vezes não tem sido confirmada. Al-Kaisi et al. (2015), ao avaliarem a produtividade do milho por dez anos, em sete localidades no estado do Iowa - EUA e sob diferentes sistemas de cultivo do solo (níveis de mobilização e rotações de culturas), observaram que, o sistema de semeadura direta proporcionou, estatisticamente, produtividades iguais ou menores que os sistemas de cultivo que promoveram o revolvimento do solo. Esses autores mencionam que os resultados podem estar ligados as diferentes condições climáticas e de solo das regiões e ao sistema de rotação de culturas adotado. Conforme Volsi et al. (2020), para melhorar a

qualidade do solo e reduzir as perdas por erosão, principalmente na região do Arenito Caiuá, sistemas conservacionistas de cultivos se fazem necessários.

Para o tratamento lâminas de irrigação, as variáveis respostas massa de espigas (com e sem palha) e massa de grãos de milho ($U_{bu} = 20,5$ e 13%) apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$). Ao relacionar essas variáveis dependentes aos valores de lâminas de irrigação (% de I_L) e ajustar um polinômio de segundo grau, este também apresentou significância estatística ao nível de 5% de probabilidade. Conforme apresentado na Figura 4, o polinômio quadrático explica em mais de 90% ($R^2 > 90\%$) o comportamento das variáveis respostas.

Figura 4. Produtividade do milho em espigas, com e sem palha (A.) e de grãos nas umidades de 20,5 e 13% (B.), em função das lâminas de irrigação aplicadas.



As taxas de variação da produtividade das variáveis respostas, em relação à lâmina aplicada ($dy dx^{-1}$), decrescem linearmente e refletem nos valores de produtividade com o incremento da lâmina aplicada. Para valores de lâminas de irrigação próximos a 100% da I_L (tratamento I3), as taxas de variação assumem valores próximos de zero e apresentam produtividades máximas (Figura 4), ao passo que para lâminas de irrigação menores que I3, devido ao déficit hídrico, apresentam taxas de variação positivas, indicando que incrementos na lâmina de irrigação podem proporcionar aumento na produtividade. Contudo, lâminas de irrigação maiores que I3, apresentam taxas de variação negativas, levando a uma redução da produtividade (Figura 4) devido ao excesso de água aplicado.

Nos tratamentos I0, I1 e I2, o armazenamento de água no solo assumiu valores inferiores ao limite crítico do fator de disponibilidade de água para a cultura, no início da floração (tratamentos I0 e I1) e no final do período de enchimento de grãos (tratamentos I0, I1 e I2) (Figura 3), o que refletiu em menores valores de produtividades da cultura (Figura 4) em relação ao tratamento I3. Mendoza-Pérez et al. (2016), ao avaliar a produção do milho submetido a déficit hídricos (0, 10, 20 e 30% da lâmina de irrigação) fora do período de floração, não observaram diferenças estatísticas de produtividade. Conforme os mesmos autores, a falta de água nos estágios fenológicos de floração e enchimento de grãos reflete negativamente na produtividade.

Lâminas de irrigação acima da capacidade de retenção de água no solo (tratamento I4), devido à saturação e

consequente percolação e lixiviação de nutrientes, também levam a uma redução na produtividade. Nos sistemas irrigados, que visam suplementar as precipitações pluviométricas, o manejo da irrigação deve estar sempre associado às previsões do tempo para evitar o excesso de água no solo decorrente de irrigações seguidas de chuvas. Em virtude disso, Souza et al. (2015) observaram que as lâminas de irrigação de 50% da evapotranspiração da cultura (ETc) proporcionaram maiores produtividades do milho doce cultivado no

período verão/outono que as lâminas de 100% da ETc.

A taxa de produtividade em relação à lâmina aplicada ($dy dx^{-1}$) igualada à relação de preços entre insumo (px) e produto (py) permite estimar a produtividade econômica da cultura (VASCONCELLOS, 2011). Para os dados de produtividade de grãos de milho ($U_{bu} = 13\%$), quando não há custos na aplicação de água ($px py^{-1} = dy dx^{-1} = 0$), uma lâmina de irrigação de 168 mm (98% da I_L ou I3) resulta em uma produtividade máxima ou técnica de 8.283 kg ha⁻¹ (Tabela 3).

Tabela 3. Estimativa da produtividade (y) de grãos de milho com umidade de 13% e lâminas de irrigação, em função da relação de preços entre insumo (px em R\$ mm⁻¹) e produto (py em R\$ kg⁻¹).

px py	Lâmina de irrigação – I		y (kg ha ⁻¹)
	Total (mm)	% de I3	
0	168	98	8.283
5	135	79	8.201
10	103	60	7.957
15	70	41	7.550
20	38	22	6.981
25	5	3	6.248

Em cenários produtivos de milho irrigado, onde a relação de preços entre insumo e produto ($px py^{-1}$) é maior que zero, é economicamente viável repor uma fração de lâmina de irrigação demandada, ou seja, irrigação em déficit (Tabela 3). Dessa maneira, quando o preço para bombear um milímetro de água for dez vezes maior que o quilograma do milho, uma lâmina de 60% da I_L , com produtividade de 7.957 kg ha⁻¹, proporciona o melhor retorno econômico. Para uma relação de preços entre insumo e produto igual a 25,764 ($y = 6.122$ kg ha⁻¹) é economicamente viável não irrigar e trabalhar no sistema de sequeiro. Segundo Xue et al. (2017), com a imposição de restrições no volume de água disponível para irrigação e o aumento nos custos de água e de energia, a irrigação do milho nas

Planícies Altas do Texas - EUA, com reposição de 75 a 80% da ETc é economicamente mais viável.

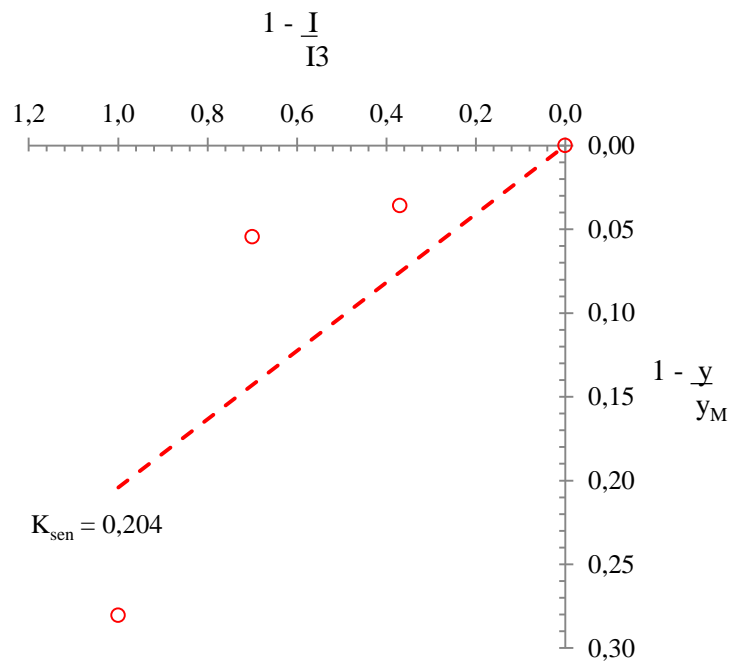
Para os tratamentos I0, I1, I2 e I3, a relação entre os valores de produtividade de grãos de milho na umidade de 13% e a produtividade em I3 (y_M), bem como a relação entre os valores de lâminas aplicadas nos tratamentos e a lâmina em I3, permite determinar o decréscimo relativo da produtividade em função da disponibilidade hídrica (Figura 5). A declividade da reta, apresentada na Figura 5, representa a sensibilidade da cultura do milho ao déficit hídrico ($K_{sen} = 0,204$), que foi manejado com irrigações suplementares. Desta maneira, para as condições avaliadas, um decréscimo na disponibilidade hídrica na cultura do milho de 50% acarretaria em

uma redução na produtividade de grãos de 10,2%.

Diferentemente ao apresentado na Figura 5, Doorenbos e Kassan (1979), ao relacionar os valores de déficit hídrico para todo o ciclo da cultura ($1 - ETc ETcp^{-1}$), em função do decréscimo de produtividade da cultura ($1 - y y_M^{-1}$), determinaram um fator

de reposta (K_y) ao déficit hídrico para a produtividade do milho igual a 1,25. Conforme os mesmos autores, esse tipo de coeficiente pode estimar o impacto do manejo da irrigação na produtividade econômica da cultura e auxiliar na escolha de estratégias de manejo.

Figura 5. Sensibilidade na produtividade (K_{sen}) de grãos de milho ($U_{bu} = 13\%$) com a redução da disponibilidade de água.



6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que: 1) os sistemas de cultivo semeadura direta e com mobilização convencional do solo não apresentaram diferenças significativas de produtividade do milho; 2) a irrigação influenciou significativamente e de forma quadrática na produtividade da cultura; 3) a irrigação manejada com a reposição de 100% da I_L (tratamento I3) proporcionou as maiores produtividades e; 4) a redução na

produtividade de grãos ($U_{bu} = 13\%$) com o decréscimo da lâmina aplicada foi igual a 20,4%.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), unidade de Londrina/PR, pela disponibilização das sementes de milho IPR-164 para a realização do experimento.

8 REFERÊNCIAS

- AL-KAISI, M. M.; ARCHONTOULIS, S. V.; KWAW-MENSAH, D.; MIGUEZ, F. Tillage and crop rotation effects on corn agronomic response and economic return at seven Iowa locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 4, p. 14011-1424, 2015.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- ANTONIEL, L. S.; PRADO, G.; TINOS, A. C.; BELTRAME, G. A.; ALMEIDA, J. V.; CUCO, G. P. Pasture production under different irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 6, p. 539-544, 2016.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019.
- BISCARO, G. A. **Meteorologia agrícola básica**. Cassilândia: UNIGRAF, 2007.
- BORGES, W. L. B.; FREITAS, R. S.; MATEUS, G. P.; SÁ, M. E.; ALVES, M. C. Produção de soja e milho cultivados sobre diferentes coberturas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 89-98, 2015.
- BORTOLUZZI, D. D.; PRADO, G.; HARA, A. T.; SOUZA, A. C. S. Precipitação mensal provável no Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 13, n. 2, p. 3314-3326, 2019.
- CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; DEBIASI, H.; MAZURANA, M. Rendimento do milho em diferentes condições físicas de solo e quantidade de resíduo na ausência e na presença de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1069-1076, 2009.
- CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; PINTO, L. B. B.; QUEIROZ, L. R. **Caracterização dos sistemas de produção de milho para altas produtividades**. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2009.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. (Irrigation and Drainage, 33).
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das formações Caiuá e Paranavaí. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 613-621, 2013.

GANJI, H.; KAJISA, T. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith model using alternative climatic data application to Afghanistan. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 34, n. 4, p. 481-486, 2019.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Zoneamento Agrícola**. Londrina: IAPAR, 2020. Disponível em: <http://www.iapar.br/>. Acesso em: 08 abr. 2020.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, London, v. 76, n. 1, p. 29-56, 2019.

MARTINS, J. D.; PETRY, M. T.; RODRIGUES, G. C.; CARLESSO, R. Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho irrigado por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. edição especial, p. 150-165, 2016.

MENDOZA-PÉREZ, C.; SIFUENTES-IBARRA, E.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; MACÍAS-CERVANTES, J. Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. **Ingeniería Agrícola y Biosistemas**, Chapingo, v. 3, n. 1, p. 29-40, 2016.

MIOTO, L. S.; ARAUJO, M. A.; SERON, C. C.; LAVANHOLI, R.; BATISTA, M. A.; LOZANO, C. S. Resistência do solo à penetração das raízes avaliada por dois penetrômetros em uma área cultivada com mandioca. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, n. 1, p. 65-79, 2016.

OLIVEIRA, E. L. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2003.

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

PRADO, G. Water distribution from medium-size sprinkler in solid set sprinkler systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 3, p. 195-201, 2016.

SANTOS, L. C.; JOSÉ, J. V.; ALVES, D. S.; NITSCHKE, P. R.; REIS, E. F.; BENDER, F. D. Space-time variability of evapotranspiration and precipitation in the State of Paraná, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 5, p. 743-759, 2017.

SILVA, G. A.; CAMÊLO, D. L.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRA FILHO, M. R.; ARAÚJO FILHO, J. C. Pedogenesis on coastal tableland area with low range altimetry in Paraíba state. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 32, n. 2, p. 458-471, 2019.

SILVA, G. H.; DIAS, S. H. B.; FERREIRA, L. B.; SANTOS, J. E. O.; CUNHA, F. F. Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 2, p. 83-89, 2018.

SOUZA, E. J.; CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; SILVA, T. R.; SANTOS, O. F. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on agronomic traits of sweet corn. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 3, p. 282-290, 2015.

TELLES, T. S.; RIGHETTO, A. J.; COSTA, G. V.; VOLSI, B.; OLIVEIRA, J. F. Conservation agriculture practices adopted in southern Brazil. **International Journal of Agricultural Sustainability**, London, v. 17, n. 5, p. 338-346, 2019.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VASCONCELLOS, M. A. **Economia micro e macro**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

VOLSI, B.; BORDIN, I.; HIGASHI, G. E.; TELLES, T. S. Economic profitability of crop rotation systems in the Caiuá sandstone area. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 50, n. 2, p. 1-11, 2020.

XUE, Q.; MAREK, T. H.; XU, W.; BELL, J. Irrigated corn production and management in the Texas High Plains. **Journal of Contemporary Water Research and Education**, Carbondale, v. 162, n. 1, p. 31-41, 2017.