



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA
NA PRODUÇÃO DE MILHO, EM CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS**

Edvaldo Eloy Dantas Júnior

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Setembro de 2012

Edvaldo Eloy Dantas Júnior

**LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA
NA PRODUÇÃO DE MILHO, EM CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS**

ORIENTADORA

Prf. Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem. Linha de pesquisa: Manejo de irrigação.

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Setembro de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- D1921 Dantas Júnior, Edvaldo Eloy.
Lâminas de irrigação localizada e adubação potássica na produção de milho, em condições semiáridas / Edvaldo Eloy Dantas Júnior. – Campina Grande, 2012.
64 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2012.
"Orientação: Profa. Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves".
Referências.
1. Milho. 2. Milho Verde - Produtividade. 3. Função de Produção.
4. Irrigação. I. Chaves, Lúcia Helena Garófalo. II. Título.

CDU 633.15(043)

“É permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que seja citada a fonte – O autor”



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



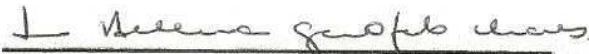
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DO DOUTORANDO

EDVALDO ELOY DANTAS JÚNIOR


LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA
NA PRODUÇÃO DE MILHO, EM CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS

BANCA EXAMINADORA

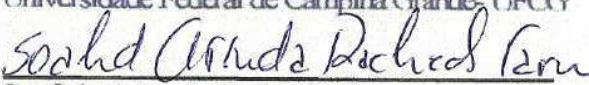
PARECER


Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves- Orientadora
Universidade Federal de Campina Grande- UFCG

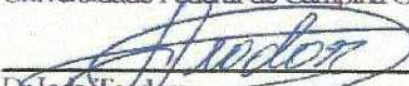
Aprovado


Dr. José Dantas Neto- Examinador
Universidade Federal de Campina Grande- UFCG

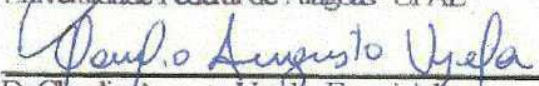
APROVADO


Dra. Sôhadi Arruda Hached Farias
Universidade Federal de Campina Grande- UFCG

APROVADO


Dr. Iedo Fendon
Universidade Federal de Alagoas- UFAL

Aprovado


Dr. Claudio Augusto Uyeda- Examinador
Inst. Federal de Edu., Ciência e Tec. da Paraíba- IFPB

APROVADO

27 de Setembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e ao Senhor Jesus Cristo, por permitirem que meus pais, Lúcia Verônica Castor do Rêgo e Edvaldo Eloy Dantas, proporcionassem a minha existência neste mundo. A minha Irmã Lúcia Virginia e a minha tia Bernadete, pela colaboração na tese.

A professora Dra. Lúcia Helena Garófolo Chaves, pela orientação e pelas amistosas cobranças com intuito de melhores precisões nos dados.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria da tese.

Aos colegas de turma: Evami, Rosalve, Roger, Ana Cristina, José Carlos, Lêda, Keliane, Kaline Dantas, Diva Lima, Gilberto Neto, José Sebastião, Iedo Teodoro, Jerônimo, Vinicius, Tadeu, Alam Nunes, Leandro, Renê e Fernando agradeço pelo companheirismo e pela boa convivência durante o curso.

Aos estagiários do CDSA/UFCG: Suayra, Jessica (as duas) e Iralécio, pela condução no campo.

Aos colegas do CDSA/UFCG: Marcio Caniello, Thiago, Ana Cristina, Augusto, Braulio, Carlinhos, Solano, Toda, Júnior, Sr. Anchieta, Tonhão, Tatô, Neno, Cicero e Preto pelas diversas formas de incentivo e ajuda na condução do experimento.

A todos os meus familiares e amigos, pela ajuda nas mais diversas formas. A minha companheira, Maria das Graças e a meu filho de coração, Thauan pela ajuda em casa na difícil limpeza e medições das espigas dos milhos.

A meus irmãos mais novos, Gabriel e João.

A meu filho amado e primogênito, José Heitor, pela inspiração para prosseguir sempre na luta. A minha filha Maria Cecília, por proporcionar a esperança de um amanhã melhor.

À CAPES, pela bolsa de doutorado, e ao CDSA/UFCG, pela área e estrutura disponibilizada ao experimento.

	Pg.
LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE EQUAÇÕES	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Geral	3
2.2. Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. O cultivo do milho no Brasil e no Nordeste brasileiro	4
3.1.1. <i>Produção do milho verde</i>	4
3.2. Necessidade hídrica da cultura do milho	6
3.3. Necessidades nutricionais de potássio pelo milho	7
3.4. Irrigação	7
3.4.1. <i>Evapotranspiração</i>	9
3.5. Eficiência no uso da água	11
3.6. Função de resposta ou função de produção	11
3.7. Produto físico marginal de fatores de produção	13
3.8. Região de produção racional	13
3.9. Taxa marginal de substituição	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1. Área experimental	14
4.1.1. <i>Localização do experimento</i>	14
4.1.2. <i>Delineamento estatístico experimental</i>	14
4.1.2.1. <i>Parcelas experimentais</i>	14
4.1.2.2. <i>Subparcelas experimentais</i>	15
4.1.2.3. <i>Bloco experimentais</i>	15
4.1.2.4. <i>Representação dos blocos na área experimental</i>	16
4.1.3. <i>Características do solo</i>	16
4.1.4. <i>Características da água</i>	18
4.1.5. <i>Preparação da área experimental</i>	18
4.1.5.1. <i>Limpeza do terreno</i>	18
4.1.5.2. <i>Aração do solo</i>	18
4.1.5.3. <i>Adubação do solo</i>	18
4.1.5.4. <i>Sistema de irrigação</i>	19
4.1.5.5. <i>Semeio do milho</i>	19
4.2. Tratos culturais e colheita	20
4.3. Variáveis meteorológicas	20
4.3.1. <i>Evapotranspiração e determinação de Kc</i>	21
4.3.1.1. <i>Determinação da evapotranspiração potencial de referência (ET₀)</i>	21
4.3.1.2. <i>Determinação da evapotranspiração potencial de cultura (ET_{pc})</i>	21

4.3.1.3. <i>Determinação do coeficiente da cultura (Kc)</i>	22
4.4. Irrigação e manejo	22
4.5. Variáveis produtivas das espigas de milho verde	22
4.5.1. <i>Comprimento de espigas sem palha (CESP)</i>	22
4.5.2. <i>Diâmetro de espigas sem palha (DESP)</i>	22
4.5.3. <i>Produtividade de espigas empalhadas (PEE)</i>	22
4.5.4. <i>Produtividade de espigas desempalhadas (PED)</i>	23
4.5.5. <i>Produtividade de espigas comerciais (PEC)</i>	23
4.5.6. <i>Porcentagem de espigas comerciais (% EC)</i>	23
4.5.7. <i>Porcentagem de massa de grãos do milho verde (% MG)</i>	23
4.6. Variáveis produtivas da planta	23
4.6.1. <i>Massa verde da planta juntamente com as espigas (MVPce)</i>	23
4.6.2. <i>Massa verde da planta sem as espigas (MVPse)</i>	24
4.6.3. <i>Eficiência no uso da água (EUA)</i>	24
4.6.3.1. <i>Eficiência no uso da água na produção de espigas comerciais (EUAec)</i>	24
4.7. Análise econômica dos custos de produção das espigas comerciais	24
4.7.1. <i>Custos de produção</i>	24
4.7.2. <i>Modelo do PEC contendo um único fator como variável independente</i>	26
4.7.3. <i>Determinação dos pontos de máximo rendimento físico e líquido</i>	26
4.7.4. <i>Determinação do modelo contendo dois fatores como variável dependente</i>	26
4.7.5. <i>Determinação do ponto de máximo rendimento físico e líquido para o modelo com duas variáveis independentes</i>	26
4.7.6. <i>Determinação da região factível</i>	27
4.7.7. <i>Determinação da produtividade física marginal</i>	27
4.7.8. <i>Taxa marginal de substituição</i>	28
4.8. Análise estatística dos resultados experimentais	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1. Variáveis meteorológicas	29
5.1.1. <i>Coeficiente de cultivo</i>	30
5.2. Irrigação aplicada	31
5.3. Parâmetros produtivos das espigas de milho verde	31
5.3.1. <i>Comprimento de espigas sem palha (CESP)</i>	31
5.3.2. <i>Diâmetro de espigas sem palha (DESP)</i>	33
5.3.3. <i>Produtividade de espigas empalhadas (PEE)</i>	36
5.3.4. <i>Produtividade de espigas desempalhadas (PED)</i>	38
5.3.5. <i>Produtividade de espigas comerciais (PEC)</i>	40
5.3.6. <i>Porcentagem de espigas comerciais (% EC)</i>	42
5.3.7. <i>Porcentagem de massa de grãos do milho verde (% MG)</i>	44
5.4. Variáveis de produção da planta	47
5.4.1. <i>Massa verde da planta juntamente com as espigas (MVPce)</i>	47
5.4.2. <i>Massa verde da planta sem as espigas (MVPse)</i>	49
5.4.3. <i>Eficiência no uso da água (EUA)</i>	50
5.4.3.1. <i>Eficiência no uso da água na produção de espigas comerciais (EUAec)</i>	51
5.5. Análise econômica dos custos de produção	52
5.5.1. <i>Modelo contendo um único fator como variável independente</i>	52
5.5.2. <i>Determinação dos pontos de máximo rendimento físico e líquido</i>	52

5.5.3. <i>Determinação do modelo contendo dois fatores como variável dependente</i>	53
5.5.4. <i>Determinação do ponto de máximo rendimento físico e líquido para o modelo com duas variáveis independentes</i>	53
5.5.5. <i>Determinação da região factível</i>	54
5.5.6. <i>Determinação da produtividade física marginal</i>	54
5.5.7. <i>Taxa marginal de substituição</i>	55
6. CONCLUSÕES	56
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
APÊNDICES	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Atributos físico-hídrico e químico do solo de cultivo do experimento	17
Tabela 2.	Atributos químicos da água de irrigação utilizada no experimento	18
Tabela 3.	Custos com a energia elétrica para reposição das diferentes % de ET _{pc}	25
Tabela 4.	Variáveis meteorológicas médias local no período experimental (13/01/2012 a 14/03/2012)	29
Tabela 5.	Coefficiente da cultura do milho AG1051 em 4 fases fenológicas da cultura	30
Tabela 6.	Lâminas de água na irrigação acumuladas nas quatro fases de avaliação das plantas de milho	31
Tabela 7.	Análise de variância do comprimento de espigas sem palha	32
Tabela 8.	Valores médios, em centímetros, do comprimento de espigas sem palha, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	32
Tabela 9.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam o comprimento de espigas sem palha	33
Tabela 10.	Análise de variância do diâmetro de espigas sem palha	34
Tabela 11.	Valores médios, em centímetros, do diâmetro de espigas sem palha, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	34
Tabela 12.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam o diâmetro de espigas sem palha	35
Tabela 13.	Análise de variância da produtividade de espigas empalhadas	36
Tabela 14.	Valores médios, em toneladas por hectare, da produtividade de espigas empalhadas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	37
Tabela 15.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a produtividade de espigas empalhadas	38
Tabela 16.	Análise de variância da produtividade de espigas desempalhadas	39
Tabela 17.	Valores médios, em toneladas por hectare, da produtividade de espigas desempalhadas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	39
Tabela 18.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a produtividade de espigas desempalhadas	40
Tabela 19.	Análise de variância da produtividade de espigas comerciais	41
Tabela 20.	Valores médios, em toneladas por hectare, da produtividade de espigas comerciais, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	41
Tabela 21.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a produtividade de espigas comerciais	42
Tabela 22.	Análise de variância da percentagem de espigas comerciais	43
Tabela 23.	Valores médios, em percentagem, da percentagem de espigas comerciais, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	43
Tabela 24.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a percentagem de espigas comerciais	44
Tabela 25.	Análise de variância da percentagem de massa de grãos do milho verde	45
Tabela 26.	Valores médios, em percentagem, da percentagem de massa de grãos do milho verde, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	45
Tabela 27.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam percentagem de massa de grãos do milho verde	46
Tabela 28.	Análise de variância da massa verde da planta juntamente com as espigas	47
Tabela 29.	Valores médios, em toneladas por hectare, da massa verde da planta juntamente com as espigas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	47

Tabela 30.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam da massa verde da planta juntamente com as espigas	48
Tabela 31.	Análise de variância da massa verde da planta sem as espigas	49
Tabela 32.	Valores médios, em toneladas por hectare, da massa verde da planta sem as espigas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio	49
Tabela 33.	Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a massa verde da planta sem as espigas	50
Tabela 34.	Médias da eficiência no uso da água para produção de espigas de milho verde comerciais	51
Tabela 35.	Parâmetros do modelo polinomial da produtividade de espigas comerciais	52
Tabela 36.	Função polinomial da PEC e significância dos coeficientes	53
Tabela 37.	Produto físico marginal da água para as diferentes lâminas de água (valor superior) e produto físico marginal do potássio para diferentes níveis de potássio	54
Tabela 38.	Valores das taxas marginais de substituição (TMS) entre a água e o potássio ($TMS_{w/k}$) e entre potássio e água ($TMS_{k/w}$)	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Curva do coeficiente de cultura (K_c) do milho, conforme Doorenbos e Pruitt (1977)	10
Figura 2.	Esquema de funções de receita bruta (a), custos (b) e receita líquida (c), donde W_m e W^* são, respectivamente, as quantidades de água que proporcionam a máxima produção e a máxima receita líquida, segundo Frizzone (1993)	12
Figura 3.	Localização do município de Sumé, no estado da Paraíba. Origem-Wikipédia Ficheiro: Paraíba Município Sumé	14
Figura 4.	Esquema ilustrativo da parcela experimental	14
Figura 5.	Esquema ilustrativo das subparcelas experimental	15
Figura 6.	Esquema ilustrativo do bloco experimental	15
Figura 7.	Esquema ilustrativo dos quatro blocos experimentais	16
Figura 8.	Esquema de plantio em fileira dupla do milho	20
Figura 9.	Umidade relativa do ar, temperatura e evapotranspiração potencial da cultura (médias diárias do período de cultivo do milho; dia da semeadura- 13/01/2012; dia da colheita do milho verde – 14/03/2012)	30
Figura 10.	Representação das médias do comprimento de espigas sem palha dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	33
Figura 11.	Representação gráfica das médias dos diâmetros de espigas sem palha dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	35
Figura 12.	Produtividade de espigas empalhadas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	38
Figura 13.	Gráfico da produtividade de espigas desempalhadas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	40
Figura 14.	Gráfico da produtividade de espigas comerciais dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	42
Figura 15.	Gráfico da percentagem de espigas comerciais dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	44
Figura 16.	Gráfico da percentagem de massa de grãos do milho verde dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	46
Figura 17.	Representação gráfica da massa verde da planta juntamente com as espigas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	48
Figura 18.	Representação gráfica da massa verde da planta sem as espigas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde	50

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Balanço de energia numa superfície de referência	10
Equação 2	Eficiência no uso da água (EUA)	11
Equação 3	Evapotranspiração potencial de referência (ET_0)	21
Equação 4	Coefficiente da cultura (K_c)	22
Equação 5	Eficiência no uso da água (EUA)	24
Equação 6	Custo do consumo de energia eléctrica (CE)	25
Equação 7	Custo total da produção (C_T)	25
Equação 8	Função de custo total no experimento	25
Equação 9	Modelo do PEC contendo um único fator como variável independente	26
Equação 10	Máxima produtividade de espigas verde (F_m)	26
Equação 11	Máxima receita líquida (F^*)	26
Equação 12	PEC (W, K)- produtividade de espigas comerciais ($t\ ha^{-1}$), em função dos fatores estudados: lâmina de água de irrigação em mm e níveis de adubação com potássio em $kg\ ha^{-1}$	26
Equação 13	Derivadas da função de produtividade de espigas comerciais, em função da lâmina de água	27
Equação 14	Derivadas da função de produtividade de espigas comerciais, em função do potássio	27
Equação 15	Região de produtividade factível para $K(W=0)$	27
Equação 16	Região de produtividade factível para $W(K=0)$	27
Equação 17	Produtividade física marginal de água (PFM_W)	27
Equação 18	Produtividade física marginal de potássio (PFM_K)	27
Equação 19	Taxa marginal de substituição da lâminas de água de irrigação por potássio ($TMS_{W/K}$)	28
Equação 20	Taxa marginal de substituição do potássio pela lâmina de água de irrigação ($TMS_{K/W}$)	28

LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA NA PRODUÇÃO DE MILHO, EM CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS

RESUMO: Para ser colhido e comercializado no estágio verde, o cultivo do milho constitui importante contribuição para a geração de renda e empregos, em pequenas e médias propriedades e tem, como subproduto, a planta ainda em estado verde e o restante das espigas inaptas à comercialização, servindo de alimentação animal ou como matéria-prima para a produção de silagem, razão pela que se objetivou avaliar o comportamento físico-econômico e a melhor eficiência no uso da água, no cultivo do milho verde submetido à irrigação com diferentes quantidades de água e diferentes níveis de adubação potássica, através de um experimento, no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido CDSA/UFCG, no município de Sumé, PB, Brasil. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com seis lâminas de água e seis quantidades de potássio, em quatro repetições; as lâminas de água distribuídas nas parcelas foram determinadas com base na evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) nos níveis de: $0,25 ET_{pc}$, $0,50 ET_{pc}$, $0,75 ET_{pc}$, $1,00 ET_{pc}$, $1,25 ET_{pc}$, e $1,50 ET_{pc}$; as subparcelas eram adubadas com diferentes quantidades de potássio (0, 20, 40, 60, 80 e 100 quilogramas de potássio por hectare). Variáveis de produção das espigas de milho verde como CESP, DESP, PEE, PED, % EC e % MG, foram avaliadas, obtendo-se médias gerais de 21,76 cm, 5,84 cm $13,38 t ha^{-1}$, $8,72 t ha^{-1}$, $7,7 t ha^{-1}$, 86,2 % e 52,4 %, respectivamente. Para as variáveis de produção das plantas MVPce e MVPse observaram-se médias gerais de $62,4$ e $49,1 t ha^{-1}$, respectivamente. A eficiência no uso da água EUA média foi de $61,76 mm t^{-1}$ ($2,02 kg m^3$). A aplicação de $680,64 mm$ de água e $72,14 kg ha^{-1}$ de potássio maximizou a produtividade física de espigas comerciais. Quando se aplicava uma lâmina de água de $674,70 mm$ e quando se adubava com $71,13 kg ha^{-1}$ de potássio, o lucro líquido era maximizado.

Palavras-chave: Produtividade de milho verde, função de produção, irrigação

BLADES OF LOCALIZED IRRIGATION AND POTASSIUM FERTILIZATION IN THE PRODUCTION OF MAIZE SEMI-ARID CONDITIONS

ABSTRACT: To be harvested and sold in the green stage, maize cultivation is an important contribution to the generation of income and employment in small and medium properties and has, as a byproduct, the plant still in the green and the rest of the spikes inept marketing, serving animal feed or as raw material for the production of silage reason that aimed to evaluate the behavior and better physical and economic efficiency of water use in the cultivation of corn subjected to irrigation with different amounts of water and different levels potassium fertilization, through an experiment at the Center for Sustainable Development of Semiarid CDSA / UFCG, in the municipality of Sumé, PB, Brazil. The experimental design was randomized blocks in split plots, with six water slides and six amounts of potassium in four replications. The plots were irrigated by water depth, determined from the potential evaporation of culture (ET_{pc}) levels: $0,25 ET_{pc}$, $0,50 ET_{pc}$, $0,75 ET_{pc}$, $1,00 ET_{pc}$, $1,25 ET_{pc}$, end $1,50 ET_{pc}$. The subplots were fertilized with different amounts of potassium (0, 20, 40, 60, 80 and 100 kg of potassium per hectare). We analyzed physiological parameters of ears of corn as CESP, DESP, PEE, PED, % EC end % MG, obtaining general average of 21.76 cm, 5.84 cm 13.38 t ha⁻¹, 8.72 t ha⁻¹, 7.7 t ha⁻¹, 86.2% and 52.4% respectively. For the physiological parameters of plants were observed MVPse MVPce and overall averages of 62.4 and 49.1 t ha⁻¹ respectively. The efficiency of water use EWU. average was 61.76 mm t⁻¹ (2.02 kg m³). The application of 680.64 mm of water and 72.14 kg ha⁻¹ potassium maximized the physical productivity of grain trade. When applied to a water depth of 674.70 mm and when fertilization up the soil with 71.13 kg ha⁻¹ potassium net income was maximized.

Key words: Productivity of corn, production function, irrigation

O semiárido brasileiro ocupa uma área de 980.133,79 km² correspondendo a 11,53 % do território nacional. Na região Nordeste 56,46 % da extensão territorial são semiáridas e na região Sudeste esse clima é encontrado em 11,09 % do território. Nessas duas regiões semiáridas, se encontra uma população de 22.598.318 brasileiros, dos quais 8.595.200 pessoas vivem na zona rural, ligados, direta ou indiretamente, às atividades agropecuárias (IBGE, CENSO 2010).

Os terrenos para plantio de culturas alimentícias, têm seu uso restringido em toda a região semiárida brasileira, observando-se cultivos apenas nos períodos chuvosos, excetuando-se os locais próximos às grandes barragens e rios perenes, exemplificados pelos perímetros irrigados ou mesmo áreas pontuais com o uso de poços para o suprimento hídrico das cultivares.

O Cariri paraibano faz parte dos subclimas semiáridos. Neste panorama as práticas da agricultura e de pecuária são limitadas pelas peculiaridades e desafios que as condições climáticas lhes impõem, nos diversos sistemas de produção. Em meio à já referenciada condição de escassez de recursos, existe a figura do pequeno agricultor e criador, ora produzindo lavouras, ora criando rebanhos de caprinos, ovinos ou de bovinos. É nesse público que todos os esforços devem ser concentrados, fomentando-os com técnicas que maximizem os lucros nas suas diversas e tão sofridas atividades de agropecuária de pequeno e médio porte.

A disseminação de técnicas em processos produtivos sistematizados, com intensificação de plantios de cultivares rentáveis e que tenham subprodutos destinados à alimentação animal, é de fundamental importância, em virtude de otimizar o uso, em especial da água e do solo.

Plantios de milho para ser colhido e comercializado no estágio verde tem, como principal característica, a produção de espigas de alto valor nutritivo para alimentação humana ou animal e, como subproduto, o “restolho”, que é a planta ainda em estado verde e o restante das espigas inaptas à comercialização, servindo de alimentação animal ou como matéria-prima, visando à confecção de silagem.

Outra característica ligada à produção de milho verde é a contribuição relevante para a geração de empregos e renda em pequenas e médias propriedades por absorver sobretudo mão-de-obra familiar na época da colheita, que é realizada de forma manual, corroborando com Paiva Júnior et al. (2001).

O município de Sumé, no cariri paraibano, situado na parte central do Estado da Paraíba, na zona fisiográfica denominada Sertão dos Currais Velhos foi agraciado, no ano de 1976, com um perímetro irrigado de 273 ha, irrigação esta 100 % por gravidade (de superfície). Conforme dados adquiridos por Moura (2002) o desenvolvimento da agricultura e da pecuária, do município de Sumé, PB, se encontra, hoje, em estado calamitoso devido, sobretudo, às estiagens prolongadas e à falta de políticas de planejamento no uso dos recursos hídricos e de solo. Observa-se, contudo, que neste município os cultivos sob irrigação localizada e níveis de adubação adequada de espécies como o milho e o feijão (colhidos verde), frutíferas etc., podem tornar-se uma atividade econômica sustentável e de alto retorno financeiro.

As práticas de agricultura irrigada aliadas a um manejo de adubação adequada, asseguram produtividade e sustentabilidade nos processos produtivos. A adubação potássica é, após o nitrogênio, o nutriente absorvido em maior quantidade pelas plantas. Este nutriente desempenha papel importantíssimo na qualidade do milho, exercendo influência positiva sobre a massa individual dos grãos e no número de grãos por espiga. Segundo Mengel & Kirkby (2001), apesar de não fazer parte de nenhum composto dentro da planta, é muito atuante nos inúmeros processos bioquímicos das plantas.

Foi nesse contexto e ante a carência em estudos voltados para esta região que surgiu a ideia de se desenvolver uma pesquisa sobre o efeito no cultivo do milho, da aplicação de níveis diferenciados de adubação potássica e diferentes quantidades de água, mediante irrigação: plena, com déficit e com excesso.

Considerando-se a importância do potássio e do fornecimento de água ao milho, tem-se como tese, que um nível adequado de potássio aliado a um uso eficiente da água em condições climáticas de semiaridez, irá refletir numa produtividade de espigas de milho verde comercializáveis e economicamente viável.

2.1. Geral

Avaliar a resposta agrônômica, econômica e técnico-econômica do cultivo do milho verde em condições de clima do Cariri paraibano, no município de Sumé, PB, em função de diferentes lâminas de irrigação e diferentes quantidades de potássio.

2.2. Específicos

- Determinar o coeficiente de cultura (K_c) do milho, nos seus diferentes estágios;
- Medir os parâmetros fisiológicos e produtivos das espigas de milho verde, em função da lâmina de água e quantitativo de potássio que maximize esses parâmetros fisiológicos e produtivos;
- Calcular a eficiência no uso da água para produção de espigas de milho verde comerciais;
- Obter a função de resposta da produtividade de espigas comerciais do milho verde submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de potássio por meio de equações de regressão;
- Determinar as quantidades de água e de potássio que proporcionam a máxima produtividade física e a máxima eficiência econômica da produtividade de espigas comerciais de milho verde;
- Determinar a taxa marginal de substituição entre os fatores lâminas de irrigação (mm ha^{-1}) e quantidade de potássio (kg ha^{-1}).

3.1. O cultivo do milho no Brasil e no Nordeste brasileiro

O milho (*Zea mays* L.), planta da família das Gramíneas (*Poacea*) e do gênero *Zea*, tem origem nas Américas, provavelmente na faixa tropical do norte da Argentina até o Canadá. É uma das culturas mais antigas do mundo, havendo provas de que é cultivada há pelo menos 4000 anos.

No Brasil, o cultivo do milho é muito expressivo sendo produzido em praticamente todo o território. Segundo dados do IBGE (2009) 5.319 municípios brasileiros cultivam o milho, o que representa 95,6 % dos municípios. Conforme o IBGE (2009) a produção nacional de milho em grão totalizou, em 2009, 51.126.952 toneladas, plantadas em uma área de 13.789.854 hectares, obtendo-se rendimento médio de 3.708 kg ha⁻¹, produtividade esta muito baixa quando comparada com os 8.670 e 4.700 kg ha⁻¹, obtido nos Estados Unidos e na China, respectivamente (ARAUJO et al., 2004).

Costa et al. (2008) enfatizam que a produtividade do milho na região nordestina é baixa em decorrência da predominância de sistemas de produção que utilizam pouca ou nenhuma tecnologia e que, normalmente há, nessa região, insuficiência e irregularidade pluviométrica. Corroborando com essa ideia Link et al. (2006) apontam que referida distribuição, irregular ou insuficiência de chuva, é um dos principais fatores limitantes à produção agrícola no Brasil; contudo ocorreu, nos últimos anos, um aumento significativo no cultivo do milho sob irrigação.

Sinaliza-se, que o uso de técnicas de irrigação propicia, aliado ao manejo de solo com adubações, retornos econômicos mais elevados na cultura do milho; apesar de que lavouras sob irrigação devem ser planejadas visando ao maior retorno financeiro da produção e ao menor impacto no ambiente, visto que os prejuízos ambientais do uso excessivo de fertilizantes, são grandes (LINK et al., 2006).

Outra forma de alavancar a produção de milho no Nordeste brasileiro seria a disponibilização de genótipos de ciclo precoce e superprecoce mais adaptados às condições de semiaridez, por completarem o ciclo de produção dentro de um espaço mais curto podendo, inclusive, coincidir com a fase de índices pluviométricos mais altos da região (COSTA et al., 2008).

3.1.1. Produção do milho verde

Contabiliza-se que no Brasil o cultivo do milho atinge, uma área de aproximadamente 28.000 ha, para consumo no estágio verde, produtividades de 9 a 15 t ha⁻¹ de espigas empalhadas. Estima-se que a abrangência do cultivo do milho verde é bem superior à da área referenciada, embora esta contabilização se torna inexequível devido principalmente à forma de comercialização informal praticada nas feiras livres dos municípios produtores, ficando fora das mensurações estatísticas nacionais de produção de milho verde. Todavia, o cultivo do milho verde constitui importante contribuição para a geração de empregos e renda nas pequenas e médias propriedades, visto que absorve, sobremaneira, mão-de-obra familiar na época da colheita, realizada de forma manual (BOTTINI et al., 1995; PAIVA JÚNIOR et al., 2001).

A utilização do milho verde é bastante ampla, podendo ser consumido *in natura* (cozido ou assado) ou processados em forma de pamonha, canjica, sorvete, bolos, mingaus etc. Observa-se ainda o uso do milho verde para processamento pelas indústrias de produtos alimentícios, tendo os grãos enlatados (VIGLIO, 1996; ARAGÃO, 2002; PEREIRA FILHO & CRUZ, 2003; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2006).

Comercializações em feiras livres e Ceasas são feitas, preferencialmente, com espigas empalhadas por serem mais resistentes a injúrias. Comumente os supermercados comercializam espigas desempalhadas, as quais são acondicionadas em bandejas protegidas com filme plástico, por ficarem mais apresentáveis e fáceis de serem colocadas em prateleiras.

Observa-se que o beneficiamento oferecido pelos supermercados às espigas de milho verde, no tocante à sua comercialização, desempalhadas e acondicionadas em bandejas protegidas com filme plástico, infere maior valor agregado ao produto, quando comparadas com as espigas empalhadas comercializadas em feiras livres. Assim é preferível obter uma porcentagem elevada de espigas comerciais. São consideradas comercializáveis as espigas de milho que apresentam comprimento maior que 15 cm e diâmetro superior a 3 cm, quando desempalhadas (PAIVA JÚNIOR et al., 2001; ALBUQUERQUE, et al., 2008).

O empalhamento das espigas e a coloração dos grãos são aspectos significativos a serem considerados na escolha de cultivares visando à produção de milho verde. A preferência por cultivares que apresentam espigas bem empalhadas (característica, que confere maior vida de prateleira e espigas menos susceptíveis ao ataque de pragas), coloração verde intensa da palha e o amarelo-claro dos grãos, decorre do fato dessas espigas serem mais atrativas comercialmente, obtendo-se maior valor na comercialização em feiras livres e Ceasas.

Entretanto, o mercado de milho verde tem-se apresentado muito desuniforme em relação às espigas comercializadas, mostrando que os produtores ainda carecem de informações a respeito das cultivares mais apropriadas comercialmente (ALBUQUERQUE, et al., 2008).

Diversos estudos envolvendo a obtenção e a recomendação de cultivares de milho, melhor manejo cultural e o efeito das condições edafoclimáticas na expressão do potencial genético da semente, têm recebido bastante atenção da comunidade científica. Contudo, informações sobre o cultivo do milho verde para consumo *in natura* são escassas, principalmente no que diz respeito à obtenção de cultivares e ao melhor manejo cultural.

Segundo Albuquerque et al. (2008) existe uma grande variação nos tipos de sementes existentes no mercado, que vai desde variedades com menor potencial produtivo e de menor custo, até híbridos simples de maior potencial produtivo e maior custo de sementes como, também, diferenças no ciclo e características como cor e textura dos grãos.

Em meio a tantas opções de variedades de milho com características específicas, seja para sanar os interesses da indústria de enlatados quanto à produção para o consumo *in natura* e ao próprio produtor, Pereira Filho et al. (2003) salientam que o milho comum e o doce deverão apresentar alguns atributos para melhor aceitação como, por exemplo, possibilidade de plantio durante o ano todo, produtividade acima de 12 t ha⁻¹, ciclo variando entre 90 e 100 dias, longevidade no período da colheita, bom empalhamento e rendimento industrial de grãos igual ou maior que 30%.

A falta de informações técnicas a respeito do desempenho produtivo e das características fisiológicas das cultivares de milho, tende a desestimular a diversificação no uso de materiais genéticos empregados para a produção de milho verde. Neste segmento vêm predominando apenas duas cultivares de uma mesma empresa, que ocupam mais de 75% da área cultivada. Com base no exposto salienta-se a necessidade de ampliar o uso de cultivares para a produção de milho verde, a fim de se ampliar as alternativas no mercado de sementes, visando atender aos sistemas de produção dos agricultores e melhorar a qualidade do produto, corroborando com as indicações de Moraes et al., (2010).

No tocante à rentabilidade econômica do milho comercializado no estágio verde, observa-se superioridade nos lucros quando se compara a do milho vendido em grãos secos. Ante toda esta particularidade, os números relativos à produção de milho verde são bem modestos quando comparados aos montantes de cultivo de milho para a produção de grãos. Contudo, o cultivo de milho verde no Brasil cresce a cada ano, devido ao valor agregado ao produto e seus derivados (VIEIRA, 2007).

Bottini et al. (1995) e posteriormente Rodrigues & Pinho (1999) explicam que o cultivo de milho verde tem apresentado crescimento acentuado na entressafra da soja e enfatizam que esta prática se torna uma alternativa viável, sobretudo para pequenos produtores, visto que nesta época os preços de comercialização do milho verde são mais altos.

3.2. Necessidade hídrica da cultura do milho

A umidade do solo se constitui em um dos fatores mais importantes da produção agrícola, a exemplo da produção de milho, que é extremamente afetada por deficiências hídricas durante o estabelecimento da cultura.

O milho é uma cultura muito resistente à incidência de sol em todo o ciclo vegetativo; no entanto, esta cultura apresenta um período crítico que vai da prefloração ao início do enchimento de grãos (MORIZET & TOGOLA, 1984). Nesta etapa fenológica o milho é sensível ao déficit hídrico, podendo-se observar tal sensibilidade nos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto enquanto no início do enchimento de grãos e na elevada transpiração que ocorre neste período em razão do maior índice de área foliar. Os eventos de formação do zigoto e o início do crescimento dos grãos, são muito suscetíveis a estresses sobretudo ao déficit hídrico (SCHUSSLER & WESTGATE, 1991a; ZINSELMEIER et al., 1995).

Cruz et al. (1997) enfatizam que o milho é cultivado em regiões cuja precipitação varia de 250 a 5.000 mm por ano, sendo que a quantidade de água consumida pelas plantas dessa cultura durante o ciclo total, é em torno de 600 mm. Os referidos autores relatam que dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20 % e de quatro a oito dias, o diminuem em mais de 50%.

Por se tratar de uma espécie de metabolismo C₄, o milho tende a expressar sua elevada produtividade quando a máxima área foliar coincide com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja déficit hídrico. Esta condição permite a máxima fotossíntese possível porém aumenta a necessidade hídrica da cultura, já que o elevado fluxo energético incidente também eleva a evapotranspiração (BERGAMASCHI et al., 2004).

Na cultura do milho a disponibilidade de água passa a ser fator decisivo no potencial de produção e rendimento, no período compreendido entre os 3º e 5º estádios, ou seja, com 85 a 90% da área foliar e florescimento, até o estágio de enchimento dos grãos (FANCELLI & DOURADO NETO, 1996).

Matzenauer et al. (1995) explicitam que muitos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de verificar os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos e identificar os períodos mais sensíveis ao déficit para a cultura do milho. Entretanto, os resultados experimentais variam dependendo da duração e da intensidade do déficit, bem como do local, tipo de solo e cultivares. De acordo com as pesquisas realizadas pelos referidos autores, o período em que foram observadas as mais altas associações entre o rendimento do milho e as variáveis hídricas, foi o que engloba a floração e o início de enchimento de grãos, caracterizando-se como o período de maior sensibilidade ao déficit hídrico.

Robins & Domingo (1953) e Denmead & Shaw (1960) relatam que as maiores reduções no rendimento de grãos de milho causadas pelo estresse hídrico, ocorrem a partir da emergência do pendão até cerca de uma semana após o espigamento. Os dados de Claassen & Shaw (1970) indicam que o período de maior sensibilidade da cultura do milho em relação ao estresse, é a partir de aproximadamente uma semana antes a duas semanas após o espigamento. Moss & Downey (1971) concluíram que o estresse antes do espigamento pode resultar na redução do número de grãos devido ao efeito da diminuição de carboidratos sobre a esterilidade dos gametas femininos. Kiniry & Ritchie (1985) mostraram que a redução no número de grãos se inicia seis dias após o espigamento, em condições de estresse. Grant et al. (1989) verificaram que o intervalo em que o número de grãos foi mais sensível ao estresse hídrico se iniciou de dois a sete dias após o espigamento e terminou 16 a 22 dias após o espigamento. O peso de grãos foi reduzido pelo estresse durante o período de enchimento de grãos e o menor peso (51% da testemunha) ocorreu com estresse no período de 12 a 16 dias após o espigamento.

Silva et al. (1992) trabalharam com cinco níveis diferentes de lâmina de água, sendo que as lâminas totais (precipitação + lâmina média aplicada) variaram entre 109 até 753 mm, para o ciclo total

da cultura, obtendo rendimentos variando entre 1.638,3 até 8.543,2 kg ha⁻¹. No trabalho de Couto et al. (1986) apesar da alta precipitação durante a fase experimental (974 mm) sua distribuição foi irregular, causando estresse hídrico nas fases de polinização e enchimento dos grãos. Com a aplicação de apenas 42 mm distribuídos durante o ciclo da cultura, ocorreu acréscimo de 44,3% no rendimento dos grãos. No tratamento que recebeu uma lâmina total de água de irrigação de 104 mm, distribuídos durante todo o ciclo da cultura, o acréscimo no rendimento dos grãos foi de 93,7%.

Segundo Bergamaschi (1992) o déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e afetando vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas, por modificar o balanço de energia do sistema. Para Kramer (1969) os efeitos causados pelo déficit hídrico são devidos às modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas. Uma das consequências mais importantes da sensibilidade do alongamento celular ao déficit hídrico é a redução da área foliar.

A redução na área foliar causa decréscimo da taxa de crescimento da planta especialmente durante os estádios iniciais de crescimento e, como resultado, menor interceptação da radiação solar. Este efeito do déficit hídrico sobre a área foliar é de caráter permanente e, no caso das culturas de hábito de crescimento determinado, não há possibilidade de compensação via aumento do número de folhas (BEGG & TURNER, 1976).

3.3. Necessidades nutricionais de potássio pelo milho

O potássio K⁺ é, em sua forma catiônica, o principal íon no estabelecimento do turgor celular e na manutenção da eletroneutralidade celular. Este elemento também é requerido como cofator de mais de 40 enzimas correlacionadas a respiração e a fotossíntese (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Pavinato et al. (2008) observaram, trabalhando com seis doses de nitrogênio (0, 80, 120, 160, 200 e 240 kg. ha⁻¹) na forma de ureia e quatro doses de potássio (0, 40, 80 e 120 kg. ha⁻¹) na forma de cloreto de potássio, ambos granulares, que a máxima produtividade de grãos de milho sob irrigação por aspersão foi obtida com a aplicação de 283 a 289 kg.ha⁻¹ de nitrogênio mas a máxima eficiência econômica ocorreu com 156 a 158 kg.ha⁻¹ de nitrogênio, não havendo incremento na produtividade com a aplicação de potássio.

Depois do nitrogênio o potássio é o elemento absorvido em maiores quantidades pelo milho, sendo que 20% são exportados nos grãos. No entanto, até pouco tempo as respostas ao potássio obtidas em ensaios de campo com o milho eram, em geral, menos frequentes e mais modestas que aquelas observadas para fósforo e nitrogênio devido principalmente aos baixos níveis de produtividades obtidas. Entretanto, se tem verificado, nos últimos anos, uma reversão deste quadro em virtude dos seguintes aspectos: a) uso frequente de formulações de fertilizantes com baixos teores de potássio; b) sistemas de produção utilizados pelos agricultores como a rotação soja-milho, uma leguminosa altamente exigente e exportadora de potássio; c) uso de híbridos de milho de alto potencial produtivo; d) conscientização dos agricultores quanto à necessidade de recuperação da fertilidade do solo, através de uso de calcário e fertilizantes, principalmente nitrogênio; e) aumento do uso do milho como planta forrageira altamente exigente e exportadora de potássio, e f) ampliação da área irrigada como uso intensivo do solo e maiores potenciais de produtividade das culturas (COELHO & FRANÇA, 2009).

3.4. Irrigação

Segundo Frizzone (2007) as práticas convencionais de irrigação se baseiam na necessidade de água da cultura, definida pela demanda evapotranspirométrica e na eficiência de aplicação de água. Para dar suporte à formulação de calendários de irrigação, as pesquisas têm sido guiadas sob quatro enfoques de manejo da irrigação: irrigação total, irrigação suplementar, irrigação com déficit e irrigação de “salvação”.

- **Irrigação total** - Neste tipo de irrigação toda água necessária para atender à demanda evapotranspirométrica da cultura é proveniente da irrigação. Este tipo de manejo é aplicado em regiões de clima árido ou semiárido ou, ainda, em regiões onde a precipitação é insignificante.
- **Irrigação suplementar** - A água necessária ao atendimento da demanda evapotranspirométrica da cultura no intervalo entre duas irrigações consecutivas é proveniente, em parte, da irrigação e, em parte, da precipitação pluviométrica efetiva, caso em que se diz que a irrigação suplementará a precipitação efetiva no atendimento da demanda de água à cultura.
- **Irrigação com déficit** - Planeja-se atender tão somente a uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração. Esse tipo de manejo pode ser praticado com irrigação total e com irrigação suplementar. O déficit de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou apenas nas fases não críticas ao déficit hídrico. Neste último caso são prováveis menores reduções na produtividade da cultura.
- **Irrigação de salvação** - O objetivo é irrigar só em período relativamente curto ou em um estágio do cultivo. Exemplo típico ocorre na irrigação da cana-de-açúcar na qual se aplica, por irrigação, a vinhaça ou a água proveniente da lavagem da cana, em duas ou três aplicações de 30 a 60 mm por mês, após o plantio para a cana planta ou após os cortes para cana soca (MATIOLE, 1998; BERNARDO, 2006). Esse tipo de manejo também tem sido utilizado na cultura do milho, no período do pré-pendoamento e na cultura do feijão, antes da floração e na formação dos grãos, quando ocorre falta de chuvas nesses períodos.

No planejamento da irrigação duas estratégias podem ser apreciadas suprir, totalmente ou parcialmente, a necessidade de água à cultura. Na irrigação **sem déficit**, quando a disponibilidade de água não é fator limitante da produção, o objetivo é aplicar uma quantidade média de água capaz de suprir totalmente o déficit hídrico e de proporcionar a máxima produção por unidade de área, evitando perda de produtividade ou de qualidade do produto, por deficiência de água. Na irrigação **com déficit**, o objetivo é maximizar a produção por unidade de volume de água aplicada (eficiência de uso da água = eficiência produtiva, atualmente denominada produtividade da água). Com este objetivo almeja-se aumentar a eficiência do uso da água e economizar água pelo aumento da eficiência de aplicação (eficiência técnica), redução das perdas de água e redução da eficiência de armazenagem. Pressupondo-se que a disponibilidade de água constitui limitação à produção agrícola e que o manejo da irrigação deve priorizar a minimização das perdas de água (PHENE, 1989; FRIZZONE, 2007).

Com a aplicação de quantidades de água menores, como é verificado nas irrigações com déficit, as produtividades tendem a ser menores; contudo, reduz-se a percolação, aumenta-se a eficiência de aplicação e há redução nos custos operacionais da irrigação além de tendência na redução da lixiviação de produtos químicos.

Todo sistema de produção nos moldes capitalista, deve ser norteado basicamente pela busca na redução dos custos de produção e maximização da receita. A transformação de matérias-primas em produto demanda capital, força de trabalho e, no caso da atividade da agricultura irrigada, energia elétrica, ou combustível fóssil. Ante este cenário surgem, ou deveriam surgir, discussões sobre manejo de irrigação, receita bruta, custos de produção, receitas líquidas etc.

Em termos econômicos, a implantação e a operação de sistemas de irrigação envolvem custos elevados e, normalmente, a máxima produtividade física não corresponde à maior receita líquida, devido a natureza complexa da resposta das culturas à irrigação, variabilidade climática e flutuações das condições econômicas (ALGOZIN et al., 1988); logo, para uma empresa agrícola a determinação de aplicação de uma lâmina de água de irrigação que proporcione a maior receita líquida, se torna importante.

Uma maneira de se escolher uma lâmina de água economicamente viável entre diferentes opções de lâminas de água existentes é a utilização de técnicas que auxiliem na tomada de decisão. Para Frizzone (2007) a otimização da irrigação considera, explicitamente, os custos e os lucros, porém

maximizar a lucratividade é um problema substancialmente mais complexo e desafiador. Identificar estratégias ótimas de irrigação necessitará de modelos detalhados das relações água-cultura e eficiência de irrigação. Fatores econômicos, como custos de produção, preços do produto, custos de oportunidade da água deverão ser explicitamente incorporados às análises.

Uma irrigação ótima implica em menores lâminas aplicadas em relação à irrigação plena, com conseqüente redução da produtividade da cultura, porém com algumas vantagens significativas. Os benefícios potenciais da irrigação com déficit advêm de três fatores: do aumento da eficiência de irrigação; da redução dos custos da irrigação e da redução dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena.

Alguns pesquisadores analisaram os benefícios econômicos da irrigação ótima em circunstâncias específicas e concluíram que a técnica pode aumentar a receita líquida proporcionada pelas culturas irrigadas (STEWART, et al., 1974; ENGLISH & NUSS, 1982; FRIZZONE, 1986; ENGLISH & NAKAMURA, 1989; MARTIN, et al., 1989; ENGLISH, 1990; FRIZZONE et al., 1995; FRIZZONE, 1998; CALHEIROS et al., 1996; QUEIROZ et al., 1996; HEINEMANN et al., 2000; ANDRADE JÚNIOR, et al., 2001; HEINEMANN, et al., 2001; PAZ et al., 2002; ENGLISH et al., 2002).

3.4.1. Evapotranspiração

A perda combinada de água para a atmosfera em forma de vapor através dos processos de evaporação da superfície do solo define, somada à transpiração estomática e cuticular das plantas, o termo evapotranspiração (ET) (TEODORO, 2003).

Durante o processo de ET a evaporação da água do solo ocorre concomitantemente com a transpiração vegetal e, por não ser fácil de separar os dois processos, considera-se a ET perda única. Desta forma, os fatores que afetam a ET são os mesmos que influenciam a evaporação da superfície líquida e da água do solo descoberto, acrescidos das características das plantas que cobrem a área em estudo (HARBECK JR. et al., 1971). Do ponto de vista os fatores que influenciam a ET podem ser divididos em fatores físicos atmosféricos e parâmetros dos vegetais, sendo a radiação, temperatura do ar, velocidade do vento e a umidade relativa do ar, os principais fatores físicos atmosféricos, e o albedo da cultura, índice de área foliar e resistência estomática, os principais fatores vegetais (TEODORO, 2003).

Dependendo das características físicas e ambientais da área em que os elementos e parâmetros meteorológicos foram medidos e estimados, a evapotranspiração pode ser definida como: evapotranspiração de referência (ET_0), evapotranspiração de cultura (ET_c), evapotranspiração real (ET_r) e evapotranspiração de oásis (ET_{oa}) (PEREIRA et al., 1997).

O conhecimento da evapotranspiração da cultura é de fundamental importância para os projetos de irrigações porém sua determinação é difícil e sujeita a muitos erros, visto que a estimativa e/ou a medida da ET_c exige equipamentos e conhecimentos técnicos que nem sempre estão ao alcance de pequenos e médios produtores.

Lisímetros são tanques enterrados no solo dentro dos quais se mede a evapotranspiração. É o método mais preciso para a determinação direta da ET_0 , desde que sejam instalados corretamente.

Dentre os diversos tipos de lisímetro, tem-se o de percolação, que consiste em se enterrar um tanque com as dimensões mínimas de 1,5 m de diâmetro por 1,0 m de altura, no solo, deixando-se sua borda superior 5 cm acima da superfície deste. Do fundo do tanque sai um cano que conduzirá a água drenada até um recipiente. O tanque tem que ser cheio com solo do local de análise, mantendo-se a mesma ordem dos horizontes. No fundo do tanque, se coloca uma camada de mais ou menos 10 cm de brita com uma camada de areia grossa. Esta camada de brita tem a finalidade de facilitar a drenagem de água que percolou através do tanque.

Uma boa adaptação ao lisímetro de percolação é o “evapotranspirômetro de Thornthwaite”. Este é um tipo de lisímetro de percolação que mantém o sistema de lençol freático constante. Nesta utilização se implementa um sistema de alimentação contínua de água de reservatórios com volume conhecido, mantendo o nível freático constante. Em resposta ao consumo hídrico pela cultura, a água se desloca para zona radicular por capilaridade, ocorrendo depleção do nível, o qual é repostado pelo sistema de alimentação, sendo conhecido o volume consumido (BERNARDO et al., 2006).

Vários são os métodos para determinação da evapotranspiração de referência (ET_0) dentre os quais estão os evaporímetros, que são equipamentos utilizados na medição da evaporação da água como, por exemplo, o *Tanque Classe A*. Em virtude do processo de evaporação da água livre no tanque (EV) e a ET_0 serem semelhantes para converter EV em ET_0 , deve-se multiplicar a EV por um coeficiente de ajuste ou coeficiente do tanque K_p ($ET_0 = K_p \cdot EV$) (BERNARDO et al., 2006).

Comumente, o K_c utilizado na determinação da ET_0 é obtido dividindo-se a evapotranspiração da cultura pela evapotranspiração de referência ($K_c = ET_c / ET_0$) mas também pode ser determinado através do quociente do balanço de energia sobre uma cultura específica pelo balanço de energia numa superfície de referência, conforme Jensen (1968)

$$K_c \approx \frac{\lambda E}{\lambda E_0} = \frac{(R_n + H + G)}{(R_{no} + H_o + G_o)} \quad \dots\dots\dots \text{Eq.1}$$

em que: K_c = Coeficiente de cultura; R_n = Saldo de radiação; H = Fluxo de calor sensível; λE = Fluxo de calor latente; G = Fluxo de calor no solo. O índice “o” designa os valores medidos na superfície de referência e, no caso de Jensen (1968), uma cultura de alfafa.

O K_c varia em função do estágio de desenvolvimento da cultura apresentando altas correlações com o índice de área foliar. Os valores do K_c (Figura 1) na cultura do milho são de 0,3 – 0,7 na fase I (da emergência até 10 % de cobertura da superfície do solo – CSS), 0,8 – 0,87 na fase II (10 a 80% da CSS), 1,04 – 1,20 na fase III (80 a 100% da CSS), 0,8 – 0,95 na fase IV (100% da CSS) e 0,35 – 0,6 na fase V (da maturação fisiológica a colheita) (DOORENBOS & PRUITT, 1977).

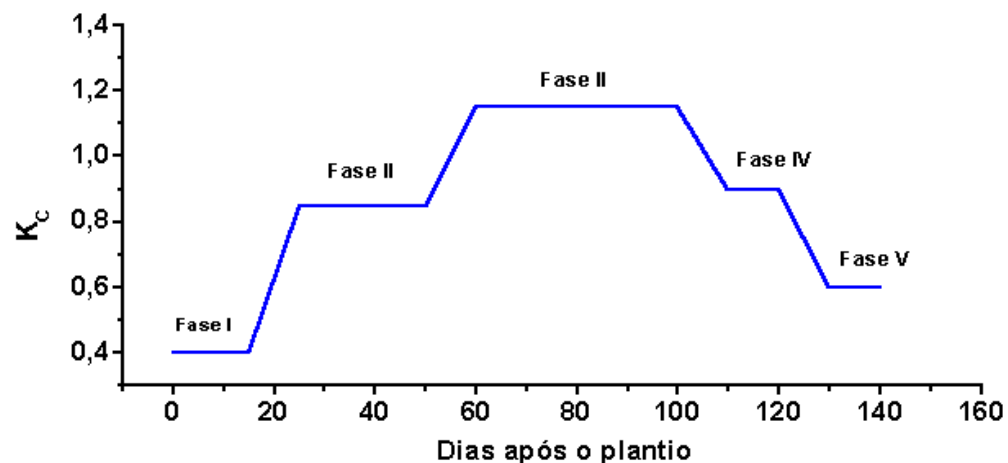


Figura 1. Curva do coeficiente de cultura (K_c) do milho, conforme Doorenbos & Pruitt (1977)

3.5. Eficiência no uso da água (EUA)

A eficiência no uso da água (EUA) é definida como o saldo de matéria seca (MS) produzido por unidade de água consumida. Essa variável é vital para o desenvolvimento de modelos de manejo ou administração de irrigação, crescimento e produtividade de cultivos agrícolas e previsão de safras.

A unidade mais usada internacionalmente para EUA é a tonelada de matéria verde ou seca por mega litro de água ($t.ML^{-1}$), equivalente a $10^{-2} t ha^{-1}.mm^{-1}$. Inman-Bamber & Smith (2005) sugerem que a EUA seja calculada pela equação :

$$EUA = \frac{Y_c}{ET_c} \dots\dots\dots Eq.2$$

em que: Y_c é a produtividade da cultura e ET_c é a evapotranspiração da cultura.

Bozkurt et al. (2011) obtiveram, em estudos para determinar os efeitos de diferentes níveis de irrigação sobre o uso de água em milho irrigado por gotejamento nas condições climáticas do Mediterrâneo Oriental, na Turquia, aplicando 6 níveis diferentes de água (20, 40, 60, 80, 100 e 120 % da evaporação do tanque classe A), rendimento médio entre 1,93 e 10,4 $t ha^{-1}$ de milho em grãos com maior eficiência no uso da água (1,77 $kg m^{-3}$). Segundo os autores, os níveis de irrigação exerceram efeito estatisticamente significativo sobre a produção de biomassa fresca, com 1 % de significância. Diferentemente do nordeste brasileiro com clima semiárido, os países mediterrânicos estão no meio de uma crise de água, e eles estão entre as regiões mais áridas do mundo, com limitados recursos renováveis hídricos que são desigualmente distribuídos no espaço e no tempo (YAZAR et al., 2009).

Estudiosos de diversas partes do mundo atentam para os estudos correlacionados à eficiência no uso da água. Segundo El-Hendawy et al. (2008) o uso eficiente da água através de sistemas modernos de irrigação é cada vez mais importante nas regiões áridas e semiáridas, com recursos hídricos limitados.

Karimi & Gomrokchi (2011) identificaram, comparando método de irrigação pressurizado (por fita gotejadora), com método de irrigação por gravidade (por sulcos), na produção de milho em Ghazvin, Iran, que a eficiência no uso da água nos plantios irrigados por gotejamento foi de 0,58 metros cúbicos de água para produzir um quilograma de milho; já nos plantios irrigados por sulco, foi necessário 1,74 $m^3 kg^{-1}$. Salienta-se que foram encontrados EUA na produção de grãos de milho entre 0,92 e 1,96 $kg m^{-3}$.

A metodologia do uso da água com eficiência busca o aumento do rendimento de culturas com menores quantitativos de água. O manejo de sistemas de irrigação por gotejamento pode ser melhorado, limitando-se a aplicação de água, de forma que se obtenha máxima eficiência no uso da água (EUA), principalmente pela diminuição da lixiviação de nutrientes para camadas inferiores às da rizosfera, indisponíveis às plantas. Essa ideia de aumento da EUA é comungada por diversos pesquisadores no mundo (VISWANATHA et al., 2002; PAYERO et al., 2008; EL-HENDAWY & SCHMIDHALTER, 2010), tendo em vista que na atualidade a água è fator limitante de diversas atividades humanas.

3.6. Função de resposta ou função de produção

As funções de resposta das culturas com bases experimentais constituem fontes valiosas de informações a serem utilizadas para tomadas de decisões sobre os empreendimentos agropecuários. Essas funções são obtidas através de conjuntos de dados levantados em experimentos científicos direcionados à quantificação da rentabilidade ou incrementos de produtividade de determinadas práticas agrícolas (FRIZZONE, 1993).

Segundo Salomon (1985) a curva de produção versus água aplicada, tem uma zona de déficit de água e outra zona após o ponto de máxima produção, que é a zona de excesso de água, Figura 2 a. Para Hargreaves & Samani (1984) o trecho da curva da relação produção versus água aplicada até 50% da quantidade que resulta na produção máxima pode ser considerado uma reta; a partir daí, os

acréscimos de água aplicados correspondem a acréscimos progressivamente menores na produção, até o ponto de máxima produção, a partir do qual os acréscimos na produção são negativos. Para English (1990) quanto mais a quantidade de água aplicada se aproxima da irrigação sem déficit, menos eficiente é a irrigação. O declínio da curva de produção a partir do ponto máximo se deve à diminuição da aeração do solo, à lixiviação dos nutrientes e doenças associadas com o solo úmido (STEGMAN et al., 1980). Para Frizzone (1993) a representação gráfica dos custos de operação e a aplicação de água são uma reta, Figura 2 b, e a da função que representa a receita líquida, é uma curva, Figura 2 c; a quantidade de água (W^*) que proporciona a receita líquida máxima é inferior à quantidade de água (W_m) que proporciona a máxima produção; e, dependendo do nível tecnológico obtém-se, para um mesmo volume de água utilizado em três situações de eficiência tecnológica decrescente, menor eficiência econômica e menor produtividade marginal.

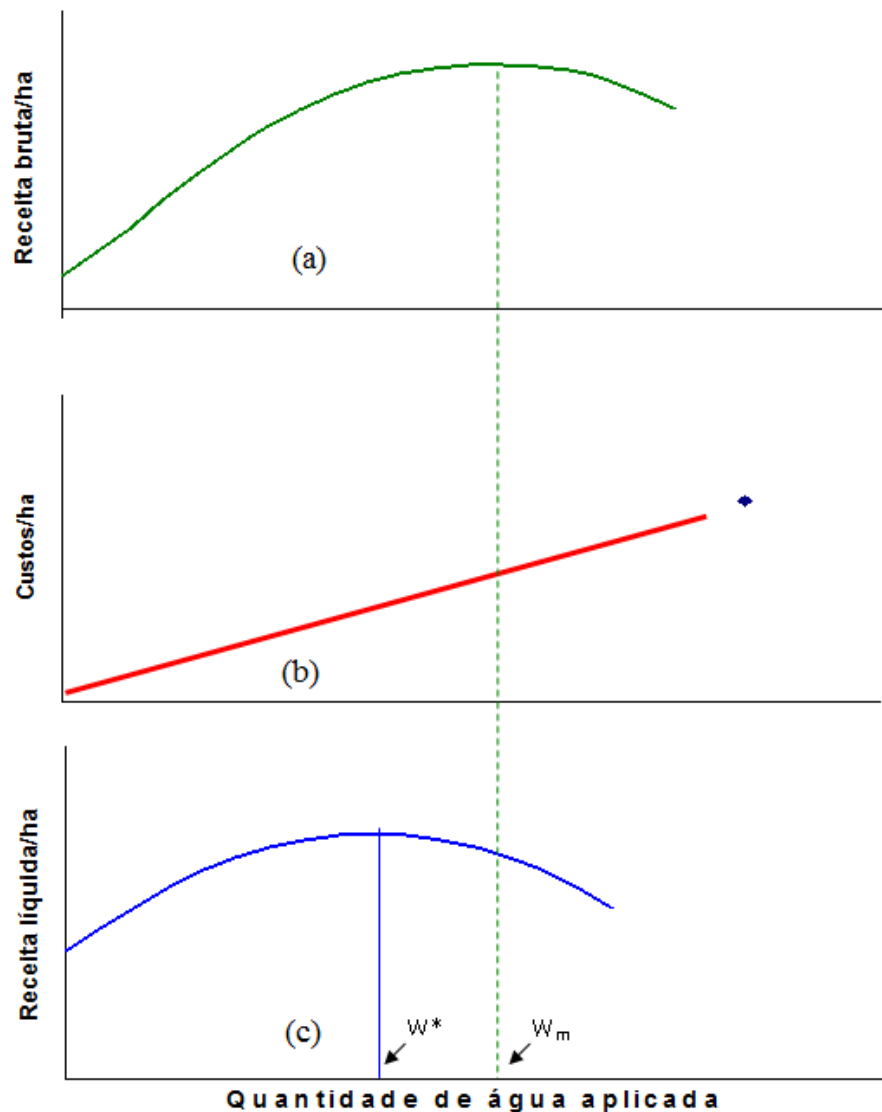


Figura 2. Esquema de funções de receita bruta (a), custos (b) e receita líquida (c), donde W_m e W^* são, respectivamente, as quantidades de água que proporcionam a máxima produção e a máxima receita líquida, segundo Frizzone (1993)

Frizzone (1993) dissertando sobre a agricultura em regiões úmidas, afirma que nessas regiões a precipitação pluviométrica garante parte da produção agrícola, o que não se verifica nas regiões áridas e semiáridas; em consequência, a representação gráfica da receita líquida em função do volume de água disponível derivado para irrigação, sofre uma mudança na origem, como mostra a Figura 2 c;

neste caso, a receita líquida proporcionada pela água de irrigação (RLI) só representa parte da receita total (RLT) da atividade agrícola, cujo volume aplicado pela irrigação VI é igual ao do V2 (volume total de água utilizada pela cultura) menos V1 (volume de água proveniente da precipitação efetiva).

3.7. Produto físico marginal de fatores de produção

O produto físico marginal de um determinado fator representa o incremento no rendimento agrícola ao se adicionar uma unidade a mais do fator considerado. O mesmo é obtido através da derivada primeira da função de produção em relação ao fator considerado, como exemplo: milímetro de água e kg de potássio por hectare (AGUIAR, 2005).

3.8. Região de produção racional

A região de produção racional demarca a parte dos gráficos de isoquantas as quais se visualizam as diversas combinações dos fatores e das respectivas produtividades em que a atividade é economicamente viável. Esta região é determinada pela análise das curvas de isoprodutos cujos limites correspondem às partes das curvas onde os fatores se comportam como substitutos, estando situada entre as duas linhas de fronteira. As linhas de fronteira são linhas que ligam pontos cuja inclinação da isoquanta é nula ou infinita (AGUIAR, 2005).

3.9. Taxa marginal de substituição

A taxa marginal de substituição de um fator de produção “A” por outro fator de produção “B” corresponde à quantidade do fator “A” que pode ser substituída por uma unidade do fator “B”, mantendo-se o mesmo nível de rendimento agrícola (FRIZZONE, 1993). Essa taxa é obtida pela relação entre o produto físico marginal do Fator “A” e o produto físico marginal do fator “B”. A exemplo da taxa marginal de substituição do fator lâmina de água na irrigação pelo fator quilograma de potássio ($TMS_{W/K}$) corresponde à lâmina de água que pode ser substituída por um quilo de potássio, com a cultura mantendo a mesma produtividade agrícola ou vice e versa.

4.1. Área experimental

4.1.1. Localização do experimento

O experimento foi conduzido em fazenda experimental do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido CDSA/UFCG (07° 40' 18" S; 36° 52' 48" W; 532 m) no município de Sumé, estado da Paraíba (Figura 3), campus da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

De acordo com a classificação climática de Köeppen, a região é do tipo climático BSh (semiárido), caracterizado por insuficiência e irregularidade das precipitações pluviais e ocorrência de temperaturas elevadas. A precipitação pluvial média anual observada no período de 1986 a 1990, foi de 695 mm. A temperatura média anual histórica é de 24°C e a umidade relativa média anual é de 57 % (ALBUQUERQUE et al., 2002).

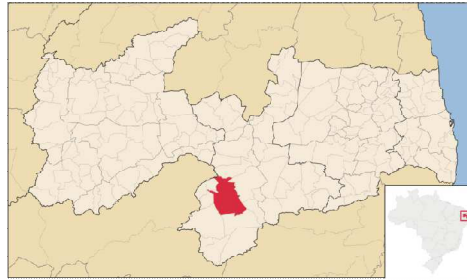


Figura 3. Localização do município de Sumé, no estado da Paraíba. Origem-Wikipédia Ficheiro: Paraíba Município Sumé

4.1.2. Delineamento estatístico experimental

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas, com seis lâminas de água e seis quantidades de potássio em quatro repetições.

4.1.2.1. Parcelas experimentais

Nas parcelas, devidamente identificadas por placas, foram alocadas as lâminas de água de irrigação, determinadas com base na evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) nos níveis de: $0,25 ET_{pc}$, $0,50 ET_{pc}$, $0,75 ET_{pc}$, $1,00 ET_{pc}$, $1,25 ET_{pc}$, e $1,50 ET_{pc}$.

As dimensões úteis de cada parcela experimental foram de 8,4 x 10,4 m, totalizando 87,36 m². Cada parcela era composta de seis linhas de irrigação de 9,0 m de comprimento, distanciadas 1,4 m uma da outra (Figura 4). As parcelas eram subdivididas em seis subparcelas com diferente quantidade de adubação potássica.

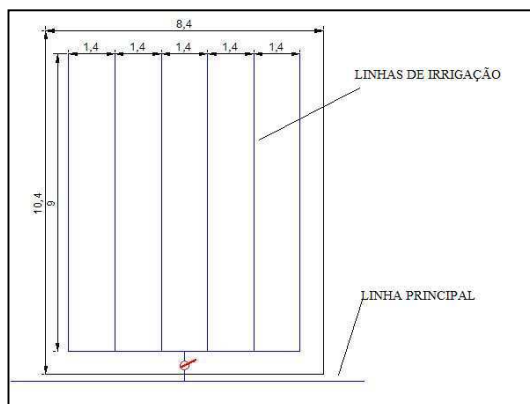


Figura 4. Esquema ilustrativo da parcela experimental

4.1.2.2. Subparcelas experimentais

Nas subparcelas, devidamente identificadas por placas, adubou-se com diferentes quantidades de potássio (0, 20, 40, 60, 80 e 100 quilogramas de K_2O por hectare). No tratamento de aplicação nula o potássio disponível as plantas era o encontrado naturalmente no solo de $0,25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, segundo sua análise química.

As subparcelas foram compostas de 3 linhas de irrigação, em que cada uma media 3,0 m de comprimento, e se distanciava 1,4 m uma da outra. As dimensões de cada subparcela, eram de 3,0 x 4,2 m, totalizando-se $12,6 \text{ m}^2$ (Figura 5). Com as 6 subparcelas que compunham cada parcela era feita a adubação com os respectivos quantitativos de potássio.

Eram consideradas plantas úteis nas análises das variáveis de produção das espigas, as plantas que copunham a linha central de cada subparcela. As demais linhas foram colhidas e subsidiaram os dados referentes às variáveis de produção da planta.

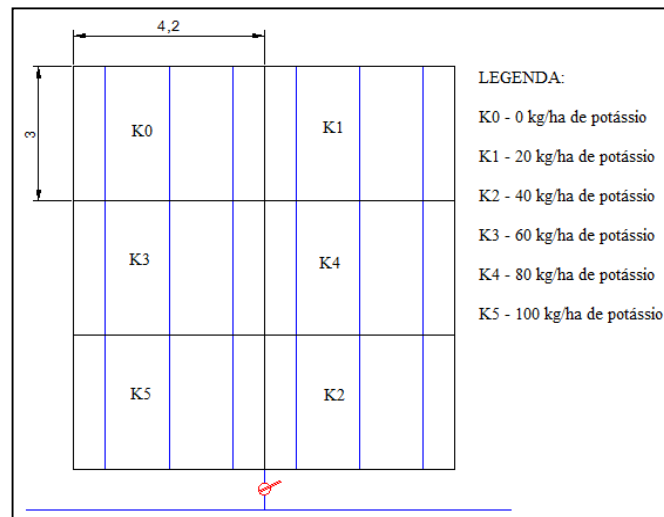


Figura 5. Esquema ilustrativo das subparcelas experimental

4.1.2.3. Bloco experimental

Cada bloco experimental continha todos os tratamentos, ou seja, seis lâminas de água e em cada lâmina (parcela) seis tratamentos de adubação potássica (subparcelas) totalizando 36 unidades experimentais. O experimento constou de 4 blocos, cada bloco media $50,4 \times 9 \text{ m}$ ou $453,6 \text{ m}^2$ (Figura 6).

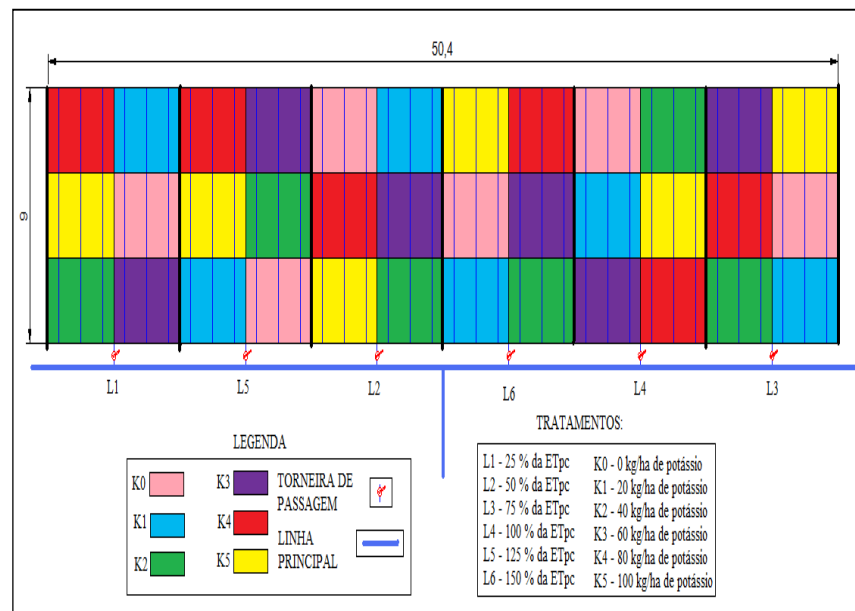


Figura 6. Esquema ilustrativo do bloco experimental

4.1.2.4. Representação dos blocos na área experimental

O experimento foi composto de 4 blocos com 144 unidades experimentais, dispostos na área como representado na Figura 4.4. As medidas dos 4 blocos experimentais eram de 50,4 x 41,4 m, tendo ruas de 1,8 m entre os blocos, totalizando uma área experimental de 2086,56 m², conforme Figura 7.

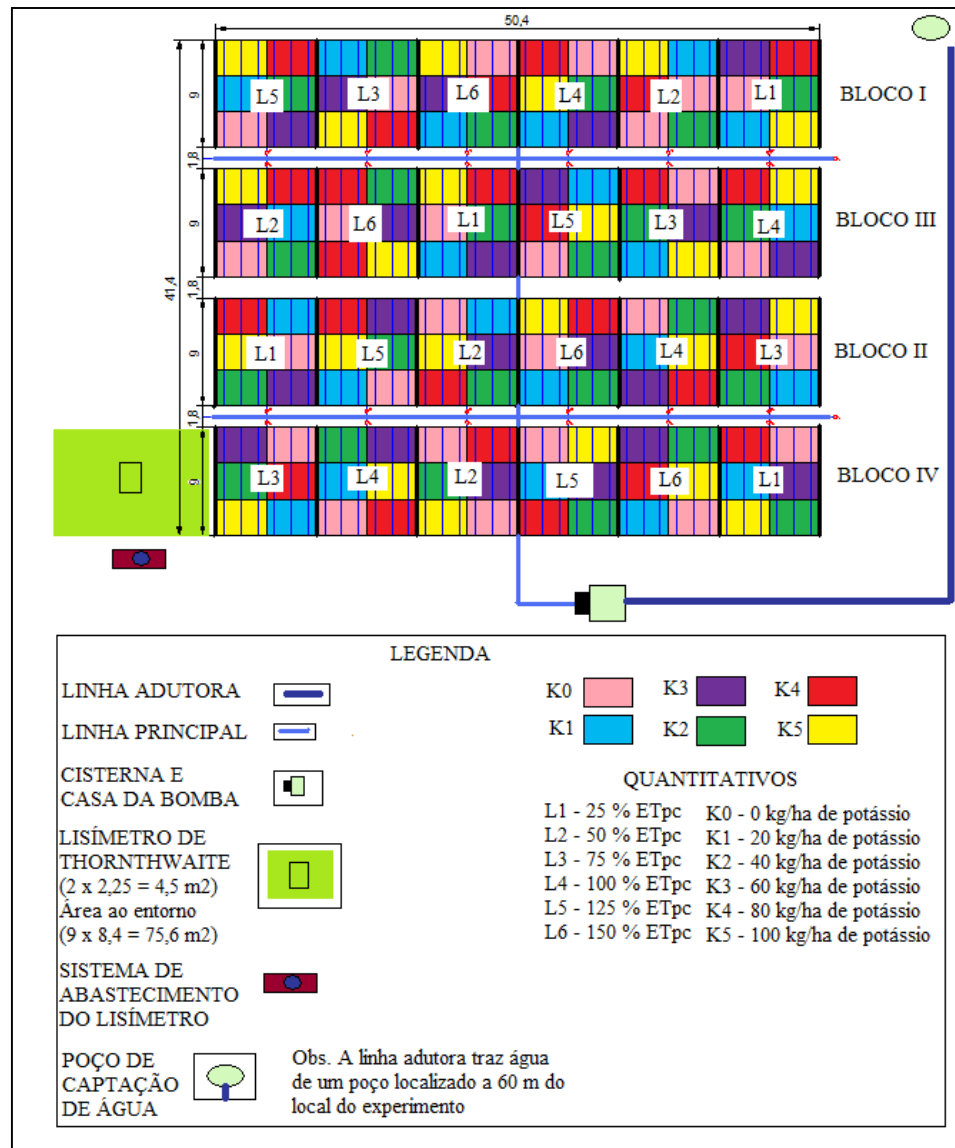


Figura 7. Esquema ilustrativo dos quatro blocos experimentais

4.1.3. Características do solo

O solo é do tipo Neossolo Litólico eutrófico, de textura média-argilosa. A caracterização físico-hídrica e química do solo foi feita no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) do Departamento de Engenharia Agrícola / UFCG, de acordo com as metodologias propostas pela Embrapa (1997).

A determinação da retenção de umidade no solo, segundo Richards, 1947, avaliou-se o ponto de murcha permanente (Pmp) com água retida no solo a um potencial matricial de -1,5 MPa, e a capacidade de campo (Cc) correspondente ao percentual de água retida a um potencial de -0,033 MPa, conforme Tabela 1.

Os atributos químicos do solo foram analisados segundo a metodologia da Embrapa (1997).

Tabela 1. Atributos físico-hídrico e químico do solo de cultivo do experimento

Características Físico-hídricas	Unidade	Valor
→ Granulometria		
Areia	g kg ⁻¹	87,50
Silte	"	271,00
Argila	"	641,50
Textura	-	Médio-argiloso
→ Densidade		
Aparente	g cm ⁻³	1,37
Real	"	2,61
→ Porosidade		
	%	41,27
→ Umidade Natural		
0,033 (Mpa)	%	42,00
1,5 (Mpa)	%	16,00
Água Disponível	%	26,00
Características Químicas		
pH em água (1:2,5)	-	7,63
CE (suspensão solo-água)	dS m ⁻¹	0,08
Carbono Orgânico	g kg ⁻¹	7,80
Matéria Orgânica	"	13,40
Nitrogênio	"	0,70
Fósforo Assimilável	mg kg ⁻¹	54,00
→ Complexo Sortivo		
Cálcio	cmol _c kg ⁻¹	10,06
Magnésio	"	7,56
Sódio	"	0,07
Potássio	"	0,25
Hidrogênio	"	0
Alumínio	"	0
CTC	"	17,94
Carbonato de Cálcio Qualitativo	-	Presença
→ Extrato de saturação		
pH (extrato de saturação)	-	6,85
CE (extrato de saturação)	dS m ⁻¹	0,27
Cloreto	meq/l	1,25
Carbonato	"	0
Bicarbonato	"	1,50
Sulfato	"	Ausente
Cálcio	"	0,75
Magnésio	"	1,50
Potássio	"	0,14
Sódio	"	0,56
Porcentagem de Saturação	%	31,33
RAS	(mmol L ⁻¹) ^{0,5}	0,53
Classe do solo		Não Salino/normal

4.1.4. Características da água

A água utilizada no experimento foi proveniente de um poço tubular, com vazão média de 18 m³ h⁻¹, locado a 60 m do local do cultivo experimental.

Para análise química e de salinidade dessa água, foram coletados 2 litros de água na saída do poço, a qual foi acondicionada em garrafa pet esterilizada e lavada em água destilada, por três vezes, para limpeza total do vasilhame. A amostra de água foi encaminhada ao Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) do Departamento de Engenharia Agrícola-UFCG, para sua análise química.

As características químicas da água podem ser vistas na Tabela 2. De acordo com Richards (1954) a água C3S1 tem salinidade alta mas com baixa concentração de sódio, sendo desaconselhada para irrigação em solos com deficiência de drenagem, podendo ser utilizados em plantas com boa tolerância aos sais.

Tabela 2. Atributos químicos da água de irrigação utilizada no experimento

Características Químicas	Unidade	Valor
pH	-	7,63
CE	dS m ⁻¹	1,48
Cálcio	mmol _c L ⁻¹	2,07
Magnésio	"	7,05
Sódio	"	6,14
Potássio	"	0,37
Carbonatos	"	0
Bicarbonatos	"	9,95
Cloretos	"	3,27
Sulfatos	"	Presença
RAS	(mmol L ⁻¹) ^{0,5}	2,88
Classe da água		C3S1

4.1.5. Preparação da área experimental

4.1.5.1. Limpeza do terreno

O local escolhido para implantação do experimento se encontrava coberto por capineira e vegetação de caatinga arbustiva, exigindo uma capina manual para limpeza completa da área de cultivo e ao entorno dela, tendo-se retirado todo o material vegetal do local. (Detalhes, Fotos A1- Apêndices)

4.1.5.2. Aração do solo

Posterior à limpeza do terreno foram colocados tubos de PVC interligados a aspersores para execução de irrigação provisória na área, a fim de molhar o solo até o ponto de friabilidade; depois de molhado o solo foi revolvido com um arado, tracionado por um trator. (Detalhes, Fotos A1- Apêndices)

4.1.5.3. Adubação do solo

Antes da adubação realizou-se a irrigação deixando-se o solo em capacidade de campo e se procedeu à adubação.

As adubações de nitrogênio e fósforo foram realizadas em consonância com a recomendação de adubação de solo para cultura do milho irrigado. Na fundação foram colocados 30 e 20 kg ha⁻¹ de nitrogênio e fósforo, respectivamente; na cobertura (momento em que as plantas apresentavam seis folhas totalmente desenvolvidas) foram colocados mais 60 k ha⁻¹ de nitrogênio, em toda a área de cultivo.

Na adubação nitrogenada utilizou-se ureia (45 % de N) sendo aplicados 66,67 kg ha⁻¹ de ureia na fundação e 133,33 kg ha⁻¹ na adubação de cobertura.

Com vista à adubação de fósforo, utilizou-se super-simples (19 % de P_2O_5) aplicados na fundação $105,26 \text{ kg ha}^{-1}$ do produto.

A adubação com potássio, fonte de variação nas subparcelas experimentais (comentado a fundo no subitem 4.2), foi toda realizada na fundação com 0, 20, 40, 60, 80 e 100 kg ha^{-1} de potássio, em que o produto utilizado foi sulfato de potássio (51 % de K_2O), sendo aplicados 0,00; 39,22; 78,43; 117,66 156,88 e $196,10 \text{ kg ha}^{-1}$ de sulfato de potássio, representando os diferentes quantitativos de potássio nas subparcelas experimentais. (Detalhes, Fotos A4- Apêndices)

4.1.5.4. Sistema de irrigação

O sistema de irrigação adotado foi o localizado com mangueira gotejadora, montado de forma a disponibilizar água a cada parcela, conforme tratamento desejado.

Em cada parcela experimental (comentado a fundo no subitem 4.1.2.1.) foram colocadas 6 mangueiras cujo comprimento era de 9 m e estavam distanciadas 1,4 m umas da outra.

As mangueiras utilizadas eram da marca Petroisa, modelo Manári (250 micra), com diâmetro nominal de 16 mm, tendo gotejadores “in line” distanciados a 20 cm um do outro. A vazão nominal era de $7,5 \text{ l h}^{-1}$ para cada metro de mangueira, numa pressão de serviço de 10 mca.

A adução de água às 6 linhas de irrigação que compunham a parcela, era mediante abertura de registro (exclusivo para cada parcela) conectado à tubulação principal de irrigação.

Do início da linha de plantio saíam mangueiras flexíveis, sem furos, conectando as mangueiras gotejadoras (dispostas na linha de plantio) a um distribuidor (entrada fêmea de $\frac{3}{4}$ ”, saída múltipla de 6 pontas de 16 mm, para mangueira) popularmente conhecido por “aranha”. Esse distribuidor era conectado diretamente a uma válvula reguladora de pressão (AMANCO - modelo PMR-15LF, entrada fêmea e saída macho de $\frac{3}{4}$ ’) com pressão de saída de 10,4 mca. Um registro de globo (colocado diretamente no regulador de pressão) interligava a linha principal de adução à parcela, controlando a entrada de água na parcela.

A linha principal de 50 mm DN era de PVC soldável e ligava todo o sistema a uma casa de controle (1,2 x 2,0 m).

Na casa de controle uma eletrobomba de 2 cv (SCHNEIDER modelo BC-92 S/T, monofásica) foi instalada para pressurizar a água coletada numa cisterna. Essa cisterna tinha a capacidade de armazenar 30 m^3 , sendo abastecida, quando necessário, pela água de um poço. A eletrobomba abastecia o sistema de irrigação a uma vazão de $10,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e pressão de 20 mca. Antes da entrada no sistema a água passava por um filtro de discos plásticos de 120 mech de (AMANCO, modelo IRR 1 $\frac{1}{2}$ ”), para evitar a entrada de partículas e entupimento dos gotejadores. Os eventos de irrigação eram realizados diariamente. (Detalhes, Fotos A2- Apêndices)

4.1.5.5. Semeio do milho

O milho foi semeado no dia 13 de janeiro de 2012, ou seja, 10 dias após a adubação. Neste período foram realizadas mais duas irrigações, totalizando três eventos (contabilizando-se a lâmina antes da adubação) com lâmina média acumulada de 15,3 mm (não contabilizada para as análises fisiológicas). (Detalhes, Fotos A4- Apêndices)

As sementes utilizadas foram do híbrido AG 1051, da Agrocere, desenvolvidas com a finalidade de uso na produção de grãos, milho verde e silagem. As plantas desse híbrido têm, como característica, sistema radicular bem desenvolvido, permitindo grande amplitude de época de plantio.

O esquema de plantio foi o de fileiras duplas em arranjo de quadrado, conforme ilustração na Figura 8. Em cada cova de plantio foram colocadas 3 sementes e após germinação foram mantidas 2 plantas por cova, até a produção. A distância entre plantas era de $0,4 \times 0,4 \text{ m}$ e entre linhas de irrigação, colocadas no centro das fileiras duplas de plantas, era de 1,4 m. A população de planta foi de 71000 plantas hectare.

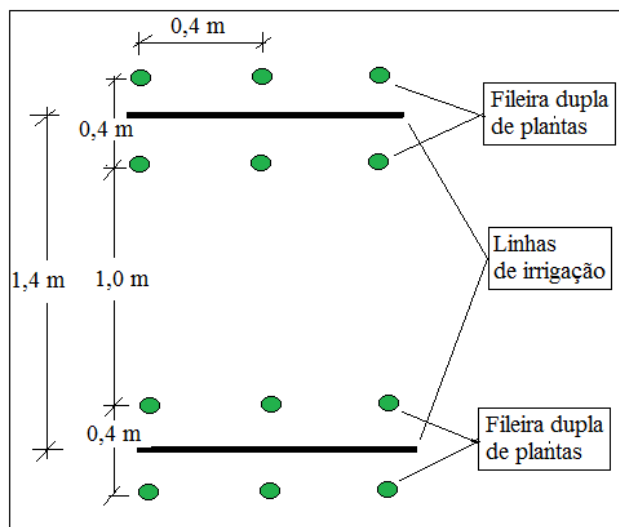


Figura 8. Esquema de plantio em fileira dupla do milho

4.2. Tratos culturais e colheita

Após 5 dias da semeadura todas as covas apresentaram três plântulas, sendo eliminada uma plântula e se mantendo, cada cova, com duas plântulas.

Aos 20 dias após o plantio (DAP) quando as plantas apresentavam 6 folhas totalmente expandidas, foi feita uma capina manual na área de cultivo e logo em seguida a segunda adubação, com 60 kg ha^{-1} de nitrogênio ($133,33 \text{ kg ha}^{-1}$ de uréia); completando 30 DAP, foi realizada nova capina manual.

Completando 23 DAP surgiram sinais de ataque de lagartas em algumas folhas, tendo sido aplicado inseticida sistêmico e de contato, do grupo químico *metilcarbomato de oxinade* nome comercial LANNAT, na dosagem de 100 mL para 100 L de água, tendo sido gasto $0,6 \text{ L ha}^{-1}$ do produto. Esse inseticida é indicado no combate à lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperla* L.). O procedimento foi repetido aos 33 DAP.

A colheita manual de espigas no estágio verde (grãos pastoso) ocorreu 62 dias após a germinação. Todas as espigas da linha central de cada subparcela foram colhidas, e acondicionadas em sacolas plásticas devidamente identificadas e encaminhadas para a área coberta, na qual foram feitas todas as medições dos parâmetros de produção das espigas em estudo.

Após a colheita restaram, na fileira central de cada subparcela, apenas as plantas sem espiga, sendo cortadas rente ao solo e pesadas, se obtendo a massa verde das plantas sem espiga.

Das três linhas que compunham as subparcelas sobraram duas linhas de plantio, dentre as quais se obteve a massa verde das plantas, juntamente com as espigas, cortando as plantas ainda com espigas, rente ao chão. (Detalhes, Fotos A5- Apêndices)

4.3. Variáveis meteorológicas

Na área experimental do CDSA/UFMG, onde foi montado o presente experimento, havia uma estação meteorológica da marca CAMPBELL- DATA LOGGER CR10X, equipada com sensores que forneciam dados de temperatura do ar ($T_m - ^\circ\text{C}$), velocidade do vento ($V_v - \text{m s}^{-1}$), saldo de radiação ($R_n - \text{W m}^{-2}$), pressão atmosférica (PA- KPa) umidade relativa do ar (UR- %) e precipitação pluvial (P- mm).

Esses parâmetros foram medidos a cada 10 minutos e armazenados em memória eletrônica; posteriormente, foram tabelados obtendo-se as médias diárias.

4.3.1. Evapotranspiração e determinação de Kc

4.3.1.1. Determinação da evapotranspiração potencial de referência (ET_0)

Para estimativa da evaporação local (EV) utilizou-se o tanque USWB classe A, circundado por solo exposto (circunferência com raio de 1,0 m do tanque). As medidas diárias de EV eram feitas às 9:00 horas, em um poço tranquilizador de metal, com um micrômetro de gancho.

Foi adotado um coeficiente de tanque Kp de 0,65, visto que a umidade relativa do ar média local era menor que 40 %, e que a velocidade média do vento era 2,55 m s⁻¹, considerado moderado (BERNARDO et al., 2006).

A evapotranspiração potencial de referência ET_0 , foi calculada pela seguinte equação:

$$ET_0 = Kt EV \dots\dots\dots Eq.3$$

onde: Kt era o coeficiente do tanque e EV era a evaporação do tanque, em mm dia⁻¹.

(Detalhes, Fotos A5- Apêndices)

4.3.1.2. Determinação da evapotranspiração potencial de cultura (ET_{pc})

Para determinação da ET_{pc} , foi construído um lisímetro de percolação, adaptado ao “evapotranspirômetro de Thornthwaite”. As dimensões desse lisímetro eram: 2,25 m de largura; 2,00 m de comprimento, totalizando 4,50 m² de área e profundidade de 1,50 m. Referido lisímetro foi construído em alvenaria dobrada, rebocado com espessura de 5 cm e impermeabilizado com revestimento cerâmico. O rejuntamento da cerâmica foi com material específico para piscina, a fim de evitar vazamentos. Para garantia da vedação hermética das paredes e fundo da cisterna, foi colocada cola de silicone acima do rejuntamento, formando-se uma película impermeável, que unia as peças de cerâmica.

No fundo do lisímetro foi colocado um tubo de PVC de 50 mm (servindo de dreno), com um registro na ponta, ligando o lisímetro a um poço coletor. Na primeira camada (0,2 m), foram colocadas, brita 19 e areia grossa para melhorar a drenagem. Neste momento foi colocado, verticalmente, um tubo de PVC de 200 mm, de 1,5 m de comprimento, com perfurações (feitas por broca de 3 mm, distanciadas umas das outras 2,5 cm) que subiam da ponta inferior até 1,0 m de altura.

No tubo de 200 mm foi colocado um adaptador conectando um sistema de boia (tipo caixa d’água), a um reservatório de 250 L, graduado e hermeticamente fechado. O suprimento hídrico do lisímetro mantinha o nível do lençol freático do lisímetro na altura da boia.

Depois dos preparos hidráulicos encheu-se o tanque com solo do local de análise, mantendo-se a mesma ordem dos horizontes

Em resposta ao consumo hídrico pela cultura, a água se deslocava para a zona radicular por capilaridade, ocorrendo depleção do nível de água no lençol freático do lisímetro, o qual era repostado pelo sistema de alimentação, sendo conhecido o volume consumido pela evaporação e a transpiração da cultura.

Para obtenção da lâmina de água (W) consumida na evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}), em mm dia⁻¹, dividia-se o volume (em litros) consumido pela área do lisímetro (4,5 m²), visto que não ocorreram eventos de precipitação no período experimental. As medições no lisímetro eram feitas diariamente, às 9:00 horas, mediante observação da graduação do volume na lateral do reservatório. (Detalhes, Fotos A3- Apêndices)

4.3.1.3. Determinação do coeficiente da cultura (K_c)

Com os dados obtidos diariamente, de ET_0 (item 4.4.1.1.) e de ET_{pc} (item 4.4.1.2), foi determinado o coeficiente de cultivo (K_c) da cultura, mediante equação:

$$K_c = \frac{ET_{pc}}{ET_0} \dots\dots\dots Eq.4$$

em que: K_c era o coeficiente de cultivo (adimensional); ET_{pc} era a evapotranspiração potencial da cultura, em $mm \text{ dia}^{-1}$ e ET_0 era a evapotranspiração de referência, em $mm \text{ dia}^{-1}$.

As fases fenológicas de avaliação do K_c foram as seguintes: (a) quando a planta apresentava 4 e 8 folhas totalmente expandidas; (b) floração e (c) de produção de milho verde, cujas espigas estavam com grãos pastosos. A folha do milho foi considerada expandida quando a linha de união lâmina-bainha (“colar”) se apresentava facilmente visível.

4.4. Irrigação e manejo

A área de influência (área umidificada) de uma linha de irrigação era de $7,2 \text{ m}^2$ ($9,0 \times 0,8 \text{ m}$). O volume de água aplicado por hora era de 67,5 L. Dividindo-se o volume (em litros) pela área da linha de irrigação (em m^2) era obtida um lâmina de 9,375 mm aplicada em 1:00 horas de irrigação.

Os tempos de funcionamento do sistema de irrigação para reposição dos níveis de água de 0,25; 0,5; 0,75; 1,00; 1,25 e 1,50 % da ET_{pc} , eram obtidos mediante a divisão de 9,375 por 0,25 ET_{pc} , 0,50 ET_{pc} , 0,75 ET_{pc} , 1,00 ET_{pc} , 1,25 ET_{pc} e 1,50 ET_{pc} , respectivamente. Os eventos de irrigação eram realizados diariamente.

O tempo total de funcionamento da eletrobomba era obtido mediante somatório do período em que a mesma estava em funcionamento.

4.5. Variáveis produtivas das espigas de milho verde

4.5.1. Comprimento de espigas sem palha (CESP)

O comprimento das espigas sem palha (CESP) de milho verde foi aferido com régua milimetrada sendo medido o comprimento da base superior à ponta da espiga desempalhada, apresentado na unidade métrica metros (m).

Na medição do CESP foram colhidas dez espigas na área útil de cada parcela experimental (linha dupla central das três linhas duplas de produção que compunham cada parcela experimental, cuja área média $1,2 \text{ m}^2 = 3,00 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$) sendo medidas e se obtendo a média dos comprimentos em cada parcela experimental.

4.5.2. Diâmetro de espigas sem palha (DESP)

O diâmetro das espigas sem palha (DESP) de milho verde foi aferido com paquímetro sendo medido o diâmetro na base superior, no meio e na ponta da espiga, obtendo-se a média do diâmetro da espiga.

Para estimativa do diâmetro de cada parcela experimental foram colhidas dez espigas na área útil de cada parcela para obter as medidas do DESP apresentadas na unidade metro (m).

4.5.3. Produtividade de espigas empalhadas (PEE)

A produtividade de espigas empalhadas (PEE) foi mensurada mediante a pesagem, em balança com precisão de 0,001 kg, das espigas de milho verde empalhadas colhidas na área útil de cada parcela experimental (linha dupla central).

Após a averiguação da massa em kg, das espigas empalhadas colhidas na área útil da parcela experimental, foi feita a extrapolação para uma área de 1 (um) hectare (ha) obtendo-se, assim, a PEE em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$).

4.5.4. Produtividade de espigas desempalhadas (PED)

A produtividade de espigas desempalhadas (PED) foi mensurada mediante a pesagem, em balança com precisão de 0,001 kg, das espigas de milho verde desempalhadas colhidas na área útil de cada parcela experimental (linha dupla central).

Após a averiguação da massa em kg, das espigas desempalhadas colhidas na área útil da parcela experimental, foi feita a extrapolação para uma área de 1 (um) hectare (ha), obtendo-se a PEE em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$).

4.5.5. Produtividade de espigas comerciais (PEC)

A produtividade de espigas comerciais (PEC) foi mensurada mediante a pesagem, em balança com precisão de 0,001 kg, das espigas de milho verde desempalhadas, maiores que 15 centímetros de comprimento e diâmetro superior a 3 centímetros, colhidas na área útil de cada parcela experimental (linha dupla central).

Após a averiguação da massa em kg, das espigas de milho verde desempalhadas colhidas na área útil da parcela experimental, foi feita extrapolação para uma área de 1 (um) hectare (ha), obtendo-se, então, a PEC em toneladas por hectare (tha^{-1}).

4.5.6. Percentagem de espigas comerciais (%EC)

A percentagem de espigas comerciais (%EC) de milho verde foi obtida pela razão entre a massa das espigas comerciais (PEC) e a massa total de espigas desempalhada (PED) da parcela, multiplicada por cem, tendo como unidade a percentagem (%).

4.5.7. Percentagem de massa de grãos do milho verde (%MG)

Foram escolhidas dez espigas de milho verde comerciais aleatoriamente, em cada parcela, para pesagem em balança com precisão de 0,001 kg, obtendo-se a M10EV em quilograma (kg).

Das dez espigas de milho verde comerciais escolhidas para determinação da M10EV, foram retirados os grãos de milho verde em cada parcela e submetidos à pesagem em balança com precisão de 0,001 kg, obtendo-se a MG10EV em quilogramas (kg).

A percentagem de massa de grãos (%MG) do milho verde foi avaliada pela relação entre o peso da massa dos grãos retirados de dez espigas (MG10EV), com o peso de dez espigas desempalhadas (M10EV) de cada parcela, tendo-se como unidade a percentagem (%).

4.6. Variáveis produtivas da planta

4.6.1. Massa verde da planta juntamente com as espigas (MVPce)

A massa verde das plantas, juntamente com as espigas, foi obtida mediante pesagem, em balança de precisão de 0,001 g.

As plantas, ainda com as espigas, das duas fileiras externas das subparcelas, eram cortadas rente ao solo, obtendo-se a massa verde das plantas juntamente com as espigas (MVPce) em kg.

Sabendo-se que as áreas de duas fileiras representam 2/3 (dois terços) da subparcela, ou seja, $8,4\ m^2$, a MVPce era extrapolaada para toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$).

4.6.2. Massa verde da planta sem as espigas (MVPse)

A massa verde das plantas sem as espigas foi obtida mediante pesagem, em balança de precisão de 0,001 g.

As plantas sem as espigas, das fileiras centrais das subparcelas, eram cortadas rente ao solo, obtendo-se a massa verde das plantas sem espigas (MVPse) em kg.

Sabendo-se que as áreas de duas fileiras representam 2/3 (dois terços) da subparcela, ou seja, 8,4 m², a MVPse era extrapolada para toneladas por hectare (t ha⁻¹).

4.6.3. Eficiência no uso da água (EUA)

A eficiência no uso da água (EUA) era definida como o saldo de matéria produzida por unidade de água consumida, calculada pela equação :

$$EUA = \frac{Y_c}{ET_c} \dots\dots\dots Eq.5$$

em que: Y_c é a produtividade da cultura e ET_c é a evapotranspiração da cultura.

4.6.3.1. Eficiência no uso da água na produção de espigas comerciais (EUAec)

A EUAec foi calculada pela divisão da produtividade de espigas comerciais (PEC, em kg), pelo volume de água utilizado (em m³) ou pela lâmina de água (em mm), para produzir uma tonelada do produto; logo a EUAec foi apresentada em duas formas: em mm t⁻¹ (água gasta na produção de cada tonelada de espigas de milho verde comercializáveis) e em kg m⁻³ (produção de cada quilograma de milho verde por metros cúbicos de água utilizada).

4.7. Análise econômica dos custos de produção das espigas comerciais

4.7.1. Custos de produção

Todos os gastos com insumos e aplicações foram criteriosamente registrados ao longo do cultivo. Desta forma, foi possível estabelecer uma função que representasse a melhor resposta física e econômica da produtividade de espigas comerciais aos tratamentos estudados. Os dados foram tratados de acordo com a metodologia proposta por Frizzone (1993); para a construção da função, foram necessários os seguintes dados:

- Preço de venda das espigas de milho verde sem palha em kg – PMv
- Preço de um kg de potássio na forma de sulfato de potássio – PK
- Preço da água - PW
- Custo de cultivo - Cc

➤ **PMv** - O preço final de venda do quilograma das espigas comerciais desempalhadas PMv foi de 1,80 R\$ kg⁻¹ (considerando-se que cada espiga verde tinha massa de 0,22 kg (média geral) e eram comercializadas a 0,40 R\$, quando vendidas a granel). Salienta-se que as espigas comerciais eram aquelas com diâmetro superior a 3 cm e comprimento superior a 15 cm, segundo recomendações de Albuquerque et al. (2008).

➤ **PK** - Na composição dos custos foi considerado o preço de aquisição do produto sulfato de potássio juntamente com os gastos de mão de obra para adubação de um hectare. O valor de PK foi de 3,30 R\$ kg⁻¹ de potássio colocado na área de plantio.

➤ **PW** - Considerou-se o custo da água igual ao valor da tarifa de energia elétrica, conforme Frizzone et. al (1994). O valor da tarifa de energia elétrica é formado pela soma do custo do consumo efetivo da energia e do custo de demanda da potência elétrica. De acordo com as normas da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), só existe tarifa de demanda quando a potência instalada é superior a 75 KVA. Tendo em vista que para as condições da presente pesquisa o sistema operou com uma potência instalada bem inferior, utilizando um motor elétrico de 2cv, o custo de demanda foi nulo,

sendo a tarifa de energia composta apenas pelo custo do consumo. O custo do consumo de energia elétrica foi estimado com base na equação a seguir:

$$CE = 0,7457 \cdot Pot \cdot Tf \cdot Pkwh \dots\dots\dots Eq.6$$

onde: CE é o custo da energia elétrica durante o ciclo da cultura, em R\$; 0,7457 é o fator de conversão de cv para kw; Pot representa a potência do motor, em cv; Tf significa o tempo de funcionamento do sistema necessário para repor a 100 % da ET_{pc} , em horas, considerando uma área irrigada de 1 ha; Pkwh é o preço do kWh, em R\$.

Na Tabela 3 estão representados os valores dos custos de energia para suprimento de água mediante % ET_{pc} em questão. Observa-se que o custo da água PW foi de 0,3166 R\$ mm^{-1} , obtido dividindo-se o custo de energia pela lâmina de água com o custo de energia elétrica.

Tabela 3. Custos com a energia elétrica para reposição das diferentes % de ET_{pc}

Parâmetros	% da ET_{pc}					
	25	50	75	100	125	150
Lâmina de água, em mm	132	264	396	528	660	792
Volume de água por hectare, em m^3	1319	2638	3958	5277	6596	7915
Tempo de funcionamento da eletrobomba, em horas	122,15	244,30	366,45	488,61	610,76	732,91
Custo da energia, em R\$	41,80	83,60	125,40	167,19	208,99	250,79
Custo do mm de água (PW)	0,3166 R\$ mm^{-1}					
Preço do kWh	0,22944 R\$ h^{-1}					
Potência da eletrobomba	2 cv					
Vazão	10,8 $m^3 h^{-1}$					
Pressa de serviço	20 mca					

➤ **Cc**—Para computar os custos de cultivo (C_c) em R\$ t^{-1} , foram considerados os gastos com limpeza da área, preparação do solo, plantio, tratos culturais, colheita beneficiamento das espigas desempalhadas para venda, transporte da área de cultivo para o local de comercialização, equipamento de proteção individual (EPI) e insumos.

Para fins de estimativa dos custos fixos consideraram-se, como investimento, o valor necessário para aquisição dos equipamentos de irrigação para 1 (um) ha, a aquisição de 1 (um) ha de terra nua e a construção da casa do conjunto motobomba. O valor do investimento foi de R\$ 5.290,20, dos quais R\$ 3.790,20 referentes ao preço do sistema de irrigação, R\$ 1.000,00 referente ao preço da terra e R\$ 500,00 correspondente à casa do conjunto motobomba. A taxa de juros foi de 12% ao ano, considerando-se ainda que os equipamentos teriam uma vida útil de 10 anos, sendo zero seu valor residual, ao final de sua vida útil.

Isso posto, o custo fixo (C_F) foi de R\$ 5.290,20 e o custo de cultivo (C_c) foi de R\$ 1.920,09.

Assumindo, como condição simplificador, que a soma do custo fixo (C_F) e do custo indiretamente dependente da quantidade de água aplicada (C_c) seja constante ($C_0 = C_F + C_c$), conforme sugerido por English (1990) e Frizone et al. (1997), pode-se expressar a função de custo total da produção (C_T) na forma linear:

$$C_T = C_0 + PWW \dots\dots\dots Eq.7$$

Tomando por base os dados observados, verificou-se que a função de custo total no experimento foi:

$$C_T = 7210,29 + 0,3166 \cdot W \dots\dots\dots Eq.8$$

4.7.2. Modelo do PEC contendo um único fator como variável independente

A função de produção contendo somente um fator como variável independente, é um polinômio de segundo grau, tendo sido determinada através da análise de regressão dos valores de produtividade de espigas comerciais, em t ha⁻¹, conforme a equação seguinte:

$$PEC = a + bX + CX^2 \dots\dots\dots Eq.9$$

onde: *PEC* é a produtividade de espigas comerciais em t ha⁻¹; *X* é o fator variável independente (em mm quando for água e em kg quando for adubação com potássio); *a*, *b*, e *c* são os coeficientes da função de produtividade.

4.7.3. Determinação dos pontos de máximo rendimento físico e líquido

Para possibilitar a determinação dos níveis do fator variável, seja lâmina de água ou níveis de adubação potássica que proporcionem a máxima produtividade de espigas verde (*F_m*) e a máxima receita líquida (*F**), foram deduzidas as seguintes equações:

$$F_m = \frac{-b}{(2.c)} \dots\dots\dots Eq.10$$

$$F^* = \frac{(C_x - PMv.b)}{2.PMv.c} \dots\dots\dots Eq.11$$

onde: *b* e *c* são os coeficientes da função de produção aqui discutida; *C_x* é o custo com o fator (em R\$ mm⁻¹ ha⁻¹, se for água e em R\$ kg⁻¹ ha⁻¹, se adubação com potássio); *PMv* é o preço da tonelada da espiga de milho verde desempalhada.

4.7.4. Determinação do modelo contendo dois fatores como variáveis dependentes

A partir dos dados finais da produtividade de espigas comerciais, com o experimento envolvendo seis lâminas de água e seis níveis de adubação com potássio, procedeu-se às análises de regressão múltipla; para tanto, selecionou-se o modelo que melhor representa (matematicamente e biologicamente) a resposta da planta de milho aos tratamentos aplicados. O critério matemático para a escolha tomou-se como base, a seleção da função com o melhor R² e melhor R² ajustado, significativos. A equação selecionada através da análise de regressão está apresentada a seguir, para o que se utilizou o software SURFER e SIGMAPLOT:

$$PEC(W, K) = A_{00} + A_{01} \cdot K + A_{02} \cdot K^2 + A_{10} \cdot W + A_{11} \cdot W \cdot K + A_{20} \cdot W^2 \dots\dots\dots Eq.12$$

em que: *PEC* (*W*, *K*) é a produtividade de espigas comerciais (t ha⁻¹), em função dos fatores estudados: lâmina de água de irrigação em mm e níveis de adubação com potássio em kg ha⁻¹; *A₀₀*, *A₀₁*, *A₀₂*, *A₁₀*, *A₁₁* e *A₂₀*, são os coeficientes do modelo analisados pelo SIGMAPLOT.

4.7.5. Determinação do ponto de máximo rendimento físico e líquido para o modelo com duas variáveis independentes

Com base na Equação 12 proposta no item 4.7.4, efetuaram-se os cálculos de derivadas da função de produtividade de espigas comerciais, em função da lâmina de água ($\frac{\partial PEC}{\partial W}$) e em função do potássio ($\frac{\partial PEC}{\partial K}$), com o intuito de se determinar os valores das variáveis independentes *W* e *K* que maximizam a produção *W_m* e *K_m* e o lucro líquido *W** e *K**, utilizando-se das seguintes equações:

$$\frac{\partial PEC}{\partial K} = A_{01} + 2A_{02}K + A_{11}W \dots\dots\dots \text{Eq.13}$$

$$\frac{\partial PEC}{\partial W} = A_{10} + A_{11}K + 2A_{20}W \dots\dots\dots \text{Eq.14}$$

A maximização da produção foi determinada resolvendo-se, simultaneamente as duas equações (13e 14) e se igualando a zero. Para a maximização do lucro líquido igualou-se $\left(\frac{\partial PEC}{\partial W}\right)$ e $\left(\frac{\partial PEC}{\partial K}\right)$ à relação entre o custo do insumo (CW ou CK) e o preço de venda do produto (PMv), ou seja:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial PEC}{\partial K} &= A_{01} + 2A_{02}K + A_{11}W = 0 \\ \frac{\partial PEC}{\partial W} &= A_{10} + A_{11}K + 2A_{20}W = 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Resolvendo o sistema obtinha-se} \\ \text{Wm e Km} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial PEC}{\partial K} &= A_{01} + 2A_{02}K + A_{11}W = \frac{CK}{PMv} \\ \frac{\partial PEC}{\partial W} &= A_{10} + A_{11}K + 2A_{20}W = \frac{CW}{PMv} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Resolvendo o sistema obtinha-} \\ \text{se W* e K*} \end{array}$$

em que: *CK* e *CW*, são os custos dos fatores potássio (R\$ kg⁻¹) e água (R\$ mm⁻¹); *PMv* é o preço das espigas (R\$ t⁻¹); *A*₀₀, *A*₀₁, *A*₀₂, *A*₁₀, *A*₁₁ e *A*₂₀, são os coeficientes da função.

4.7.6. Determinação da região factível

Na definição da região factível os valores das variáveis independentes (lâminas de água de irrigação e potássio) foram determinados igualando-se as equações 13 e 14 a zero e se colocando, respectivamente, *K* e *W* em evidência e assumindo *W*=0 e *K*=0, obtendo-se os valores de *K*(*W*=0) e *W*(*N*=0), equações 15 e 16, respectivamente.

$$W(K = 0) = \left(\frac{-A_{10}}{2.A_{20}}\right) \dots\dots\dots \text{Eq.15}$$

$$K(W = 0) = \left(\frac{-A_{01}}{2.A_{02}}\right) \dots\dots\dots \text{Eq.16}$$

4.7.7. Determinação da produtividade física marginal

A produtividade física marginal para a lâmina de água de irrigação e para o potássio, representa a produtividade de espigas comerciais por unidade de cada fator empregado na produção da cultura. Os fatores foram determinados através das equações:

$$PFM_W = A_{10} + 2.A_{20}.W + A_{11}.K \dots\dots\dots \text{Eq.17}$$

$$PFM_K = A_{01} + 2.A_{02}.K + A_{11}.W \dots\dots\dots \text{Eq.18}$$

onde: PFM_W é a produtividade física marginal de água em tonelada de espigas de milho comerciais por mm ha^{-1} ; PFM_K é a produtividade física marginal do potássio em tonelada de espigas de milho comerciais por kg de potássio aplicado; W e K são, respectivamente, lâmina de água de irrigação e níveis de potássio aplicados.

4.7.8. Taxa marginal de substituição

A taxa marginal de substituição é uma medida com a qual se pode determinar até que ponto é possível substituir lâminas de água de irrigação por potássio ($TMS_{W/K}$) ou, então, potássio por lâmina de água de irrigação ($TMS_{K/W}$). Para tanto, foram utilizadas, no cálculo, as seguintes equações:

$$TMS_{W/K} = \frac{-PFM_W}{PFM_K} \dots\dots\dots \text{Eq.19}$$

$$TMS_{K/W} = \frac{-PFM_K}{PFM_W} \dots\dots\dots \text{Eq.20}$$

Para Frizzone (1986 e 1993) as combinações dos fatores (W) e adubação com potássio que determinam o custo mínimo para cada curva de isoproducto são iguais às combinações que proporcionam a taxa marginal de substituição de água por potássio ($TMS_{W/K}$). Esta, por sua vez, se iguala à razão (PW/PK) entre o preço da água, em $\text{R\$ mm}^{-1}$ e o preço do potássio, em $\text{R\$ kg}^{-1}$.

4.8. Análise estatística dos resultados experimentais

Os dados obtidos foram avaliados em esquema de parcelas subdivididas. Para os fatores lâminas de água e quantidades de potássio realizou-se a análise de regressão polinomial, por se tratar de fatores quantitativos, utilizando-se o programa computacional SISVAR versão 5.1e SIGMAPLOT.

5.1. Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas (Tabela 4) analisadas nesta pesquisa, foram temperatura do ar (T_m - °C), velocidade do vento (V_v - $m\ s^{-1}$), saldo de radiação (R_n - $W\ m^{-2}$), pressão atmosférica (PA- KPa) umidade relativa do ar (UR- %), precipitação pluvial (P- mm) e evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc} - mm) do dia 13 de janeiro de 2012 (dia da sementeira do milho) ao dia 14 de março de 2012 (dia da colheita do milho verde), no total de 62 dias.

Tabela 4. Variáveis meteorológicas médias local no período experimental (13/01/2012 a 14/03/2012)

Fase de avaliação	Dias corrido	Parâmetros meteorológicos						
		T_m °C	V_v $m\ s^{-1}$	R_n $W\ m^{-2}$	PA KPa	UR %	P mm	ET_{pc} mm
4° Folha	24	**27,04	**2,68	*285650	**95,47	**42,2	*0,0	*136,8
8° Folha	12	**26,59	**2,57	*131919	**95,48	**36,6	*0,0	*83,2
Floração	6	**25,67	**2,53	*47376	**95,67	**34,4	*0,0	*55,2
Milho Verde	20	**25,08	**2,41	*166652	**95,67	**28,2	*0,0	*252,5
Total/Média	*62	**26,10	**2,55	*631597	**95,57	**35,3	*0,0	*527,7

T_m - Temperatura média do ar (°C); V_v - Velocidade do vento ($m\ s^{-1}$); SR- Saldo de Radiação ($W\ m^{-2}$); PA- Pressão atmosférica (Kpa); URA- Umidade relativa do ar (%); Pp.-Precipitação (mm); ET_{pc} - Evapotranspiração potencial da cultura (mm); * total acumulado na fase vegetativa; ** Média observada na fase vegetativa

A temperatura média observada no período do experimento foi de 26,10 °C, tendo-se observado dias com temperatura média máxima de 30,26 °C e mínima de 20,97 °C. A velocidade do vento manteve-se com média de 2,55 $m\ s^{-2}$. A pressão atmosférica se manteve na média de 95,57 KPa. A umidade relativa do ar média foi de 35,3 %, salientando-se que no período do experimento não foi detectado ocorrência de chuva.

No tocante à evapotranspiração potencial da cultura verificou-se uma média geral de 8,3 $mm\ dia^{-1}$ e nos 62 dias, uma ET_{PC} de 527,7 mm, mediante medição no evapotranspirômetro de Thornthwaite. Para Jara et al. (1998) a evapotranspiração do milho estimada para o período de 40 dias após o plantio, era de 172 mm com média de 4,3 $mm\ dia^{-1}$. Ao comparar os valores da presente pesquisa com os dados descritos pelos referidos pesquisadores, observa-se que aos 42 dias após o plantio foram gastos 275,2 mm, valor de 37,5 % maior que o indicado pelos autores. Meirelles et al. (2003) encontraram valores de evapotranspiração da cultura do milho de 9,3 a 12,9 $mm\ dia^{-1}$, superiores aos encontrados por Cunha et al. (1996) que observaram, no período de maturação do milho, taxas de 6,67 $mm\ dia^{-1}$.

Na Figura 9 estão representadas graficamente as médias diárias da umidade relativa do ar e a temperatura do ar e da evapotranspiração potencial da cultura medida no local do experimento (ÁREA EXPERIMENTAL/CDSA/UFCEG/SUMÉ, PB).

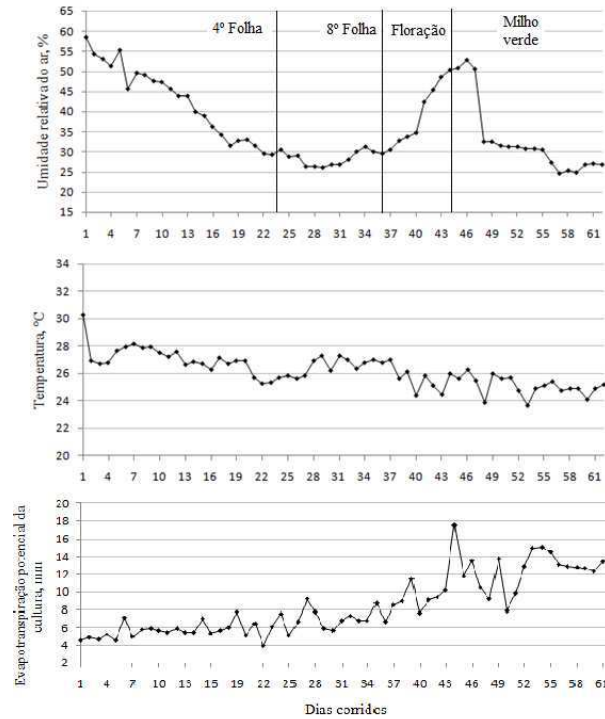


Figura 9. Umidade relativa do ar, temperatura e evapotranspiração potencial da cultura (médias diárias do período de cultivo do milho; dia da sementeira- 13/01/2012; dia da colheita do milho verde – 14/03/2012)

5.1.1.1. Coeficiente de cultivo

Considerando os dados meteorológicos demonstrados anteriormente, de velocidade do vento, umidade relativa do ar e evapotranspiração potencial da cultura, determinou-se o coeficiente da cultura nas fases em que a planta apresentou 4 e 8 folhas totalmente expandidas, na fase de floração e na fase de produção do milho, em estágio de espigas verdes, conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Coeficiente da cultura do milho AG1051 em 4 fases fenológicas da cultura

Fase de avaliação	Dias corridos	ET _{pc} (mm) acumulado	ET ₀ (mm) acumulado	Kc na fase
4º Folha	24	136,77	198,29	0,69
8º Folha	12	83,21	101,27	0,82
Floração	6	55,23	53,06	1,04
Milho Verde	20	252,49	207,90	1,21

Na determinação da evapotranspiração de referência (utilizando-se o tanque USWB classe A) foi adotado um coeficiente de tanque Kt de 0,65, visto que a umidade relativa do ar média local era menor que 40 %, e que a velocidade média do vento era 2,55 m s⁻¹, considerado moderado (BERNARDO et al., 2006).

O coeficiente da cultura, Kc, foi, na fase em que a planta apresentava 4 e 8 folhas totalmente expandida, de 0,69 e 0,822; nas fases de floração e de produção de milho verde, cujas espigas estavam com grãos pastosos, o Kc foi de 1,041 e 1,214, respectivamente. Dados muito semelhantes foram propostos por Allen et al. (1998) que indicavam Kc de 0,7; 0,87; 1,04 e 1,2 para as fases de 4 folhas, 8 folhas, floração, e produção, respectivamente.

5.2. Irrigação aplicada

As lâminas de reposição de água correspondentes a 25, 50, 75, 100, 125 e 150 % da ET_c , calculadas para as fases vegetativas da cultura em que as plantas apresentavam 4 e 8 folhas totalmente expandidas, floração e produção, estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Lâminas de água na irrigação, acumuladas nas quatro fases de avaliação das plantas de milho

Fase de avaliação	Dias corridos	Lâminas de água na irrigação (% ET_{pc}), mm					
		25%	50%	75%	100%	125%	150%
4º Folha	24	34	68	103	137	171	205
8º Folha	12	21	42	62	83	104	125
Floração	6	14	28	41	55	69	83
Milho Verde	20	63	126	189	252	316	379
Total	62	132	264	396	528	660	792

Cruz et al. (1997) enfatizam que o milho é cultivado em regiões cuja precipitação varia de 250 a 5.000 mm por ano, sendo que a quantidade de água consumida pelas plantas dessa cultura durante o seu ciclo total é em torno de 600 mm, valor próximo ao encontrado para evapotranspiração potencial da cultura de 528 mm, nesta pesquisa.

5.3. Parâmetros produtivos das espigas de milho verde

5.3.1. Comprimento de espigas sem palha (CESP)

De acordo com a análise de variância do comprimento das espigas de milho verde sem palha (CESP), a lâmina de irrigação (W), os quantitativos de potássio (K) aplicados às plantas na irrigação e adubação, bem como a interação (W x K) entre esses dois fatores de produção, interferiram com significância estatística a nível de 1 % de probabilidade no CESP, como se verifica na Tabela 7. A média geral do CESP observada na pesquisa, foi de 21,76 cm, ou seja, 45,07% acima do comprimento mínimo necessário adotado para classificação de espigas de milho verde comerciais, que é de 15 cm, adotado por Albuquerque et al. (2008).

Os coeficientes de variação (CV) segundo Pimentel-Gomes (1985) de 1,42 % nas parcelas (compostas pela lâminas de irrigação) e de 1,23 % nas subparcelas (compostas pelas adubações diferenciadas de potássio) são considerados de baixo erro indicando boa precisão experimental.

Alguns autores de literaturas estatísticas, ao exemplo de Ferreira (2000), instruem que, para melhorar a eficiência de experimentos cujo delineamento estatístico seja o de parcelas subdivididas, os pesquisadores devem aumentar o número de repetições do experimento ou colocar o grupo de tratamentos de maior importância, caso em que as lâminas de irrigação, nas subparcelas, pelo fato do erro experimental das subparcelas ser geralmente, menor que o da parcela isto porque o grau de liberdade (GL) do resíduo “b” (subparcela) é maior ou igual ao GL do resíduo “a” (parcela). A não colocação das lâminas de irrigação em subparcelas neste experimento, decorre da limitação de recursos financeiros e da quantidade de áreas aptas insuficientes à experimentação.

Tabela 7. Análise de variância do comprimento de espigas sem palha

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	205,46366	41,09273	433,0648**
Erro- W	18	1,70799	0,09489	
Parcelas	23	207,17165		
Potássio (K)	5	994,75050	198,95010	2772,2066**
Int. W x K	25	13,45564	0,53823	7,4997**
Erro- K	90	6,45894	0,07177	
Total	143	1221,83673		

CVdas parcelas (W) = 1,42%
 CVdas subparcelas (K) = 1,23%
 Média geral = 21,76 cm
 Nº de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$)

^{ns} não significativo ao nível

Os valores médios obtidos para comprimento das espigas de milho verde sem palha (CESP) em função dos tratamentos das lâminas de água aplicadas e da adubação com potássio, podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores médios, em centímetros, do comprimento de espigas sem palha, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (cm)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W₁- 132	<u>16,45</u>	17,25	19,14	21,10	23,41	21,60	19,82
W₂- 264	17,30	18,20	19,80	22,70	24,06	22,30	20,73
W₃- 396	18,29	18,61	21,03	23,48	25,27	23,78	21,74
W₄- 528	18,21	19,55	22,01	25,11	26,11	24,41	22,57
W₅- 660	19,03	21,30	23,03	25,20	<u>26,86</u>	25,30	23,45
W₆- 792	18,48	19,60	21,01	24,42	26,00	23,92	22,24
Médias (cm)	17,96	19,09	21,00	23,67	25,28	23,55	

O maior comprimento de espigas observado, foi de 26,86 cm (Tabela 8) cuja combinação para obtenção dessa média foi com 660 mm de água (125 % da ET₀) e com adubação potássica de 80 kg ha⁻¹ o dobro da quantidade recomendada na análise do solo. Notadamente, a menor média do CESP observada foi de 16,45 cm nas lâminas de 132 mm combinada com a adubação de 0 kg ha⁻¹ de potássio (neste tratamento o potássio disponível à planta foi o encontrado naturalmente no solo de 2,5 mmolc kg⁻¹). Dourado Neto et al. (2003) estudaram o efeito de populações em variedades de milho com adubação de 50 kg ha⁻¹ de K₂O, 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e uma precipitação acumulada 600 mm, em milho AG 1051 com população média de 30.000 plantas ha⁻¹, e obtiveram comprimento médio das espigas de 21,5 cm, 19,95 % menor que a média máxima encontrada no presente experimento. Moraes et al. (2010) obtiveram, utilizando 28, 98 e 56 kg ha⁻¹, respectivamente de N, P e K, comprimento de espiga de milho verde da cultivar AG 1051 com 17,7 cm, sendo 34 % menores que os CESP na combinação W₅K₄ e 18,66 % menores que a média geral observada neste experimento. Outros

pesquisadores relatam comprimentos médios de espigas de milho verde, da cultivar AG 1051, com 16,1 cm (SANTOS et al., 2005).

A representação gráfica das médias do comprimento das espigas sem palha (CESP) dentro das parcelas, compostas pelas lâminas de irrigação, assim como nas subparcelas compostas pela adubação com potássio, é vista na Figura 10.

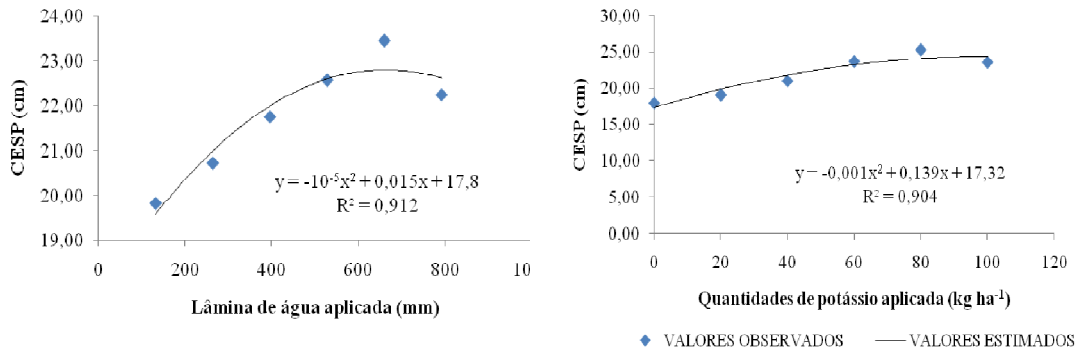


Figura 10. Representação das médias do comprimento de espigas sem palha dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Os modelos de regressão (Tabela 9) para estimar o CESP dentro das lâminas de irrigação e na adubação potássica, apresentaram R^2 de 0,912 e 0,904, respectivamente, indicando ótimo nível de correlação com os dados observados experimentalmente. De acordo com o modelo de regressão, uma lâmina de 750 mm maximiza o CESP a um valor de 23,43 cm enquanto um quantitativo de 69,5 kg ha⁻¹ de potássio promoveria um CESP máximo de 22,15 cm.

Tabela 9. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam o comprimento de espigas sem palha

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	$CESP = -0,00001 W^2 + 0,015 W + 17,8$, com $R^2 = 0,912$ $CESP_{max} = 23,43$ cm Para $W = 750$ mm
Potássio (K)	$CESP = -0,001 K^2 + 0,139 K + 17,32$, com $R^2 = 0,904$ $CESP_{max} = 22,15$ cm Para $K = 69,5$ Kg ha⁻¹

O comprimento das espigas de milho é bastante influenciado pelo processo de fertilização dos óvulos, visto que o número de grãos por espiga refletirá no seu comprimento. Neste estágio de desenvolvimento evidencia-se a fragilidade da planta frente a estresses ambientais, especialmente o hídrico. Sob limitação de umidade tanto os estilos-estigmas como os grãos de pólen, tendem à dessecação, causando baixa polinização e, portanto, baixo número de grãos de milho na espiga além de comprimento reduzido (MAGALHÃES et al., 2002).

5.3.2. Diâmetro de espigas sem palha (DESP)

Observando a análise de variância dos valores dos diâmetros das espigas de milho verde sem palha (DESP) percebe-se, na Tabela 10, significância estatística a nível de 1 % de probabilidade da

igual a 5,43 centímetros maior em 55, 25%, que o referencial adotado por Albuquerque et al. (2008), para espigas de milho verde comerciais (3 cm) infere-se que os fatores de produção interferiram de maneira positiva, no aspecto do diâmetro das espigas. As espigas colhidas no estádio verde podem ser comercializadas com ou sem palha. Geralmente CEASA's e feirantes comercializam espigas com palha enquanto supermercados e estabelecimentos que comercializam hortaliças embalam as espigas em bandejas protegidas com filme plástico; Por isto, o comprimento e o diâmetro da espiga sem palha são atributos importantes, sendo consideradas comercializáveis as espigas que apresentam comprimento maior que 15cm e diâmetro maior que 3 cm (PAIVA JÚNIOR et al., 2001).

Segundo Pimentel-Gomes (1985) coeficientes de variação (CV) de 1,24 % nas parcelas (compostas pela lâminas de irrigação) e de 1,12 % nas subparcelas (compostas pelas adubações diferenciadas de potássio) são considerados de baixo erro, indicando boa precisão experimental.

Tabela 10. Análise de variância do diâmetro de espigas sem palha

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	36,22876	7,24575	1375,2316**
Erro- W	18	0,09484	0,00527	
Parcelas	23	36,32359		
Potássio (K)	5	139,21889	27,84378	6515,9164**
Int. W x K	25	7,43667	0,29747	69,6123**
Erro- K	90	0,38459	0,00427	
Total	143	183,36374		

CVdas parcelas (W) = 1,24 %
 CVdas subparcelas (K) = 1,12 %
 Média geral = 5,84 cm
 Nº de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$)

^{ns} não significativo ao nível

Na Tabela 11 se encontram os valores médios obtidos para o diâmetro das espigas de milho verde sem palha (DESP) em função dos tratamentos das lâminas de água aplicadas e da adubação com potássio.

Tabela 11. Valores médios, em centímetros, do diâmetro de espigas sem palha em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (cm)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	3,81	4,23	4,50	6,02	6,20	5,80	5,09
W ₂ - 264	4,04	4,53	4,81	6,20	6,70	6,03	5,38
W ₃ - 396	4,30	4,80	5,40	6,70	6,90	6,50	5,77
W ₄ - 528	4,53	5,30	6,21	6,81	7,05	7,20	6,18
W ₅ - 660	4,20	6,00	6,70	7,41	7,81	7,51	6,60
W ₆ - 792	4,33	5,51	6,05	6,51	7,05	6,81	6,04
Médias (cm)	4,20	5,06	5,61	6,61	6,95	6,64	

Todas as médias verificadas para o DESP foram superiores a 3 cm (parâmetro do diâmetro de espigas comerciais) de forma que em todos os tratamentos foram atingidas espigas com DESP comerciável. A combinação W₅K₄, ou seja, 660 mm de água e 80 kg ha⁻¹ gerou espigas com 7,81 cm de diâmetro valor 2,5 vezes maior que o esperado segundo os parâmetros comerciais (3 cm).

Vieira et al. (2010) obtiveram, estudando a produção do milho verde adubado com 300 kg ha⁻¹ do formulado 08-30-20 de NPK, ou seja, com 60 kg ha⁻¹ de potássio, em uma população de 35000 plantas por hectare, médias de 4,91; 5,18; 4,9 e 5,06 cm, muito semelhantes às da média obtida neste experimento, de 6,61 cm nos tratamentos com 60 kg ha⁻¹. Quando se compara a maior média observada por Vieira et al. (2010), de 5,18 cm com a média de 6,61 cm nos tratamentos com 60 kg ha⁻¹, ela foi superior em 21,63 % do que aquela. Blanco et al. (2011) observaram, estudando a influência de diferentes lâminas de água na produção do milho AG 1051 que em adubação de 50 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio o diâmetro de espigas de milho verde teve pequeno aumento com a lâmina de irrigação e passou de 4,7 cm, na lâmina de 165 mm para 5,4 cm, na lâmina de 494 mm. Ao observar as médias obtidas nas lâminas de irrigação dentro dos seis níveis de adubação, deste experimento, elas variaram de 5,09 cm, na lâmina de irrigação de 132 mm, a 6,18 cm, na lâmina de irrigação de 528 mm.

A representação gráfica das médias do diâmetro das espigas sem palha (DESP) dentro das parcelas, compostas pelas lâminas de irrigação, tal como nas subparcelas, compostas pela adubação com potássio, é vista na Figura 11.

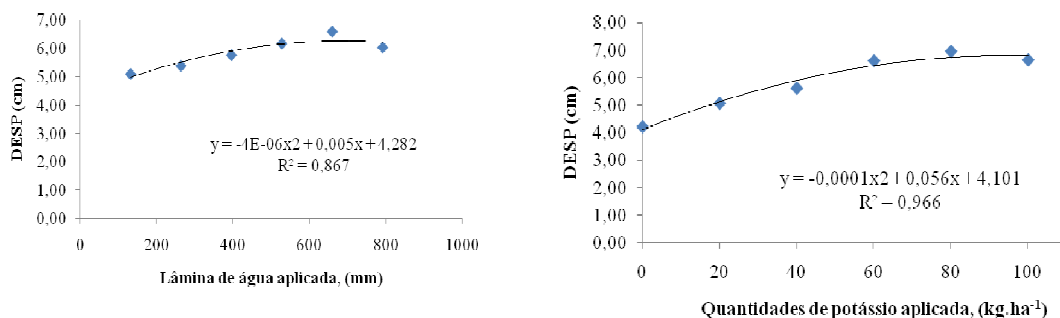


Figura 11. Representação gráfica das médias dos diâmetros de espigas sem palha dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Os modelos de regressão (Tabela 12) para estimar o DESP dentro das lâminas de irrigação e da adubação potássica, apresentaram R² de 0,867 e 0,966, respectivamente, indicando ótimo nível de correlação entre o modelo estimado e os dados observados experimentalmente.

Tabela 12. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam o diâmetro de espigas sem palha

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	DESP = $-0,000004 W^2 + 0,005 W + 4,282$, com R ² = 0,867
	DESP _{max} = 5,84 cm Para W = 625 mm
Potássio (K)	DESP = $-0,0001 K^2 + 0,056 K + 4,101$, com R ² = 0,966
	DESP _{max} = 11,94 cm Para K = 280 Kg ha⁻¹

Observa-se que em uma lâmina de água de 625 mm distribuídos no ciclo, poderão ser obtidas

deve-se, contudo, atentar que, fisiologicamente, o híbrido AG 1051 utilizado não teria capacidade de gerar espigas com este diâmetro visto que não foram encontrados relatos literários para este híbrido, com espigas atingindo diâmetros dessa magnitude. Com o exposto e mesmo se obtendo um modelo matemático de ótima correlação ($r^2 = 0,966$), este modelo não é adequado para a estimativa do DESP de uma cultura do híbrido AG 1051.

5.3.3. Produtividade de espigas empalhadas (PEE)

Pela análise de variância dos valores da produtividade de espigas empalhadas (PEE) na Tabela 13, verifica-se significância estatística a nível de 1 % de probabilidade da: lâmina de água de irrigação (W); dos quantitativos de potássio (K) aplicados às plantas na adubação e da interação (W x K) entre esses dois fatores de produção. A média geral da PEE, igual a $13,38 \text{ t ha}^{-1}$ superior a $10,76 \text{ t ha}^{-1}$, foi a máxima produtividade de milho com palha obtida por Blanco et al. (2011) e de $6,5 \text{ t ha}^{-1}$ obtida por Morais et al. (2010) para o híbrido de milho AG 10 51.

Tabela 13. Análise de variância da produtividade de espigas empalhadas

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	759,65865	151,93173	15,5921**
Erro- W	18	175,39500	9,74417	
Parcelas	23	935,05364		
Potassio (K)	5	934,41734	186,88347	61,4784**
Int. W x K	25	186,33963	7,45359	2,4520**
Erro- K	90	273,58418	3,03982	
Total	143	2329,39479		

CVdas parcelas (W) = 23,34 %

CVdas subparcelas (K) = 13,04 %

Média geral = $13,38 \text{ t ha}^{-1}$

Nº de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$)

^{ns} não significativo ao nível

Os coeficientes de variação (CV) de 23,34 % nas parcelas e de 13,04 % nas subparcelas, compostas pelas lâminas de água na irrigação e pelas quantidades de potássio na adubação, são de alto erro experimental, respectivamente. De acordo com Pimentel-Gomes (1985) CV abaixo de 20 % são considerados de médio erro e entre 20 e 30 % de alto erro, indicando moderada precisão experimental.

As médias da produtividade de espigas empalhadas em função dos tratamentos das lâminas de água aplicadas na irrigação e da adubação com potássio, estão representadas na Tabela 14.

Tabela 14. Valores médios, em toneladas por hectare, da produtividade de espigas empalhadas em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (t ha ⁻¹)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	4,99	6,95	9,24	14,66	12,19	10,58	9,77
W ₂ - 264	7,23	9,57	10,83	13,11	15,31	10,52	11,09
W ₃ - 396	9,19	10,72	14,93	16,06	15,78	13,86	13,42
W ₄ - 528	10,37	15,20	15,52	16,42	15,76	13,17	14,41
W ₅ - 660	13,98	11,00	15,95	19,38	21,20	16,96	16,41
W ₆ - 792	11,69	11,61	16,06	17,36	19,11	15,05	15,15
Médias (t ha⁻¹)	9,57	10,84	13,76	16,16	16,56	13,36	

Pela Tabela 14 a maior média geral foi de 16,56 t ha⁻¹, dentro da adubação potássica de 80 kg ha⁻¹; já para as lâminas de água de irrigação, a maior média geral foi de 16,41 t ha⁻¹, com 660 mm de água. Combinando a lâmina de água e a quantidade de potássio as que proporcionaram maior produtividade (W₅K₄) obteve-se, em média, 21,2 t ha⁻¹ de PEE. Nesta combinação, a cada 1 kg ha⁻¹ de potássio aplicado ao solo, foram produzidos 265 kg ha⁻¹ de espigas de milho empalhadas. Do mesmo modo, para cada milímetro de água aplicada nas irrigações foram produzidas 32,12 kg ha⁻¹ de espigas de milho empalhadas (maiores discussões no item 5.4.3 - Eficiência no uso da água). Comentou-se, anteriormente, que Blanco et al. (2011) obtiveram a média de PEE de 10,76 t ha⁻¹ isto com uma lâmina de água de 530 mm e com um quantitativo de 25,5 kg ha⁻¹ de potássio. Com base nesses dados, verifica-se que os referidos pesquisadores produziram 421,9 e 20,3 kg ha⁻¹ de espigas de milho empalhadas a cada kg ha⁻¹ de potássio aplicado ao solo e a cada milímetro de água aplicada nas irrigações, respectivamente; ou seja, Blanco et al. (2011) conseguiram superar, em 37,19 %, o ganho de massa de espigas empalhadas para cada kg ha⁻¹ de potássio, comparando os dados daqueles pesquisadores com os dados desta pesquisa; contudo, no tocante à água observou-se superioridade de 36,8 % dos dados da presente pesquisa no ganho de massa de espigas empalhadas. A combinação W₀K₀ representou a menor média da PEE com apenas 4,99 t ha⁻¹, ou seja, 76,46 % mais baixa que a média maior observada no experimento (21,2 t ha⁻¹).

Albuquerque et al. (2008) obtiveram média de produtividade de espigas empalhada de 13,79 e 12,26 t ha⁻¹ para cultivares comerciais e experimentais, respectivamente. Rodrigues et al. (2009) relatam PEE de 13,84 t ha⁻¹; resultados semelhantes foram observados por Cardoso et al. (2003), Monteiro et al. (2002), Pereira Filho et al. (2003) utilizando os híbridos comerciais (AG 1051 e AG 4051) e híbridos simples experimentais.

Graficamente, foram representadas as médias em t ha⁻¹, da produtividade de espigas empalhadas (PEE) (Figura 12) dentro das parcelas compostas pelas lâminas de irrigação, assim como nas subparcelas, compostas pela adubação com potássio.

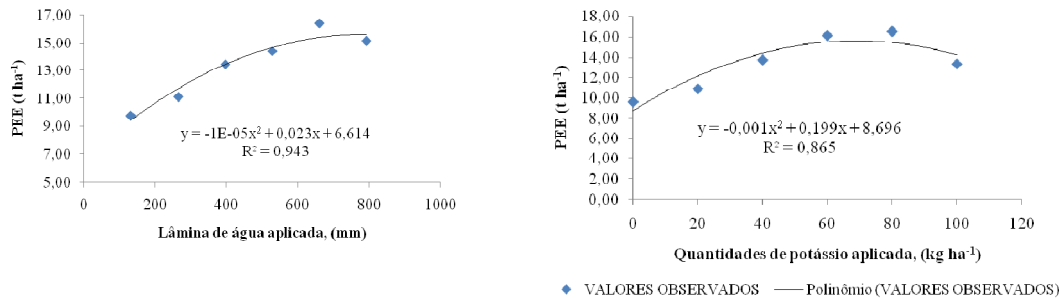


Figura 12. Produtividade de espigas empalhadas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Na Tabela 15 podem ser observados os modelos de regressão para as lâminas de água de irrigação e para adubação com potássio, assim como R^2 de 0,943 e 0,865 das duas equações que predizem a PEE em função da lâmina (W) e da adubação (K) respectivamente.

Tabela 15. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a produtividade de espigas empalhadas

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	$PEE = -0,00001 W^2 + 0,023 W + 6,614$, com $R^2 = 0,943$ $PEE_{max} = 19,84 \text{ t ha}^{-1}$ Para $W = 1150 \text{ mm}$
Potássio (K)	$PEE = -0,001 K^2 + 0,199 K + 8,696$, com $R^2 = 0,865$ $PEE_{max} = 18,60 \text{ t ha}^{-1}$ Para $K = 99,5 \text{ Kg ha}^{-1}$

Pela equação de regressão da fonte de variação da lâmina, obtem-se uma PEE máxima de 19,84 $t ha^{-1}$, com uma lâmina de água de 1150 mm; já pela equação de regressão da fonte de variação potássio obtem-se PEE máxima de 18,6 $t ha^{-1}$ com 99,5 $kg ha^{-1}$ de potássio na adubação.

5.3.4. Produtividade de espigas desempalhadas (PED)

Na Tabela 16 se encontra a análise de variância da produtividade de espigas desempalhadas. As lâminas de água aplicadas na irrigação tiveram efeito significativo, a nível de 1 % de probabilidade sobre a produção de espigas desempalhadas, tal como as quantidades de potássio, aplicadas na adubação, e a interação entre os dois fatores água e potássio. Blanco et al. (2011) observaram, avaliando o efeito de diferentes lâminas de água, que a variação das quantidades de água aplicadas às plantas exerceu efeito significativo na produtividade do milho verde com palha e sem palha, e no comprimento das espigas de milho.

Os efeitos favoráveis causados pelos fatores lâmina de água na irrigação e quantidades de potássio no comprimento, diâmetro das espigas e na produtividade de espigas empalhadas, discutido anteriormente, refletiram na produtividade de espigas desempalhadas.

A média geral obtida neste experimento foi de 8,72 $t ha^{-1}$ de espigas sem palha, conforme Tabela 16. Santos et al. (2005) ressaltaram, estudando o comportamento de dez cultivares de milho, entre esses o AG 1051, que a massa das espigas de milho verde desempalhadas variou de 5,58 a 10,51 $t ha^{-1}$, sendo que sete dos dez cultivares alcançaram produtividades estatisticamente semelhantes e acima de 7,1 $t ha^{-1}$.

Dentro das parcelas de irrigação o coeficiente de variação (CV) foi de 22,54 %, ou seja, com erro experimental alto; nas subparcelas nas quais foram colocados os diferentes quantitativos de

potássio, o CV foi de 13,01 %, com erro experimental médio, segundo Pimentel-Gomes (1985). O maior CV avaliado nas parcelas pode ter sido influenciado por desuniformidade de aplicação de água, no sistema de irrigação. Mesmo se tratando de um sistema de irrigação localizado, com eficiência de aplicação de água de 98 % (dados do fabricante da fita gotejadora) em algum momento um gotejador ou outro poderia estar obstruído, causando deficiência hídrica em algumas plantas dentro da parcela ou, em alguns casos problemas de vazamento com mangueiras que, ocasionalmente, estouravam, fazendo com que houvesse maior variação nas médias das parcelas; outro fator pode ser correlacionado à genética das sementes, ocasionando variações.

Tabela 16. Análise de variância da produtividade de espigas desempalhadas

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	334,25590	66,85118	17,3081**
Erro- W	18	69,52370	3,86243	
Parcelas	23	403,77960		
Potássio (K)	5	402,92552	80,58510	62,6204**
Int. W x K	25	79,00108	3,16004	2,4556**
Erro- K	90	115,81940	1,28688	
Total	143	1001,52560		

CVdas parcelas (W) = 22,54 %

CVdas subparcelas (K) = 13,01 %

Média geral = 8,72 t ha⁻¹

Nº de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < 0,01)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade (0,01 < p < 0,05)

^{ns} não significativo ao nível

Os valores médios da produtividade de espigas desempalhadas, cujas fontes de variação foram as quantidades de água e de potássio, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Valores médios, em toneladas por hectare, da produtividade de espigas desempalhadas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (t ha ⁻¹)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	3,05	4,29	5,98	9,40	8,03	6,80	6,26
W ₂ - 264	4,72	6,08	7,85	8,52	9,75	6,83	7,29
W ₃ - 396	6,02	7,00	9,60	10,47	10,29	9,05	8,74
W ₄ - 528	6,75	10,04	10,15	10,71	10,27	8,59	9,42
W ₅ - 660	9,12	7,18	10,39	12,64	13,93	11,06	10,72
W ₆ - 792	7,62	7,57	10,47	11,32	12,49	9,80	9,88
Médias (t ha ⁻¹)	6,21	7,03	9,07	10,51	10,79	8,69	

A combinação de W₁K₀ resultou na menor massa obtida, com 3,05 t ha⁻¹ de espigas desempalhadas. Comparando a combinação W₅K₄ com a massa de 13,93 t ha⁻¹ (maior massa obtida), com W₁K₀, verifica-se um aumento de 4,56 vezes na produtividade das espigas sem palha.

Ao desdobramento das lâminas de água dentro dos quantitativos de potássio a maior média observada foi de 10,72 t ha⁻¹ e a menor foi de 6,26 t ha⁻¹, com 660 e 132 mm, respectivamente. Na

avaliação dos quantitativos de potássio dentro das lâminas de água a maior média foi de 10,79 t ha⁻¹ com 80 kg ha⁻¹, menor média foi de 6,21 t ha⁻¹, no tratamento de 0 kg ha⁻¹ de potássio (neste tratamento o potássio disponível à planta foi o encontrado naturalmente, no solo de 2,5 mmol_c kg⁻¹).

Moraes et al. (2010) obtiveram, avaliando oito cultivares diferentes, massa de espigas desempalhadas de 4,824 t ha⁻¹ para a cultivar AG 1051, e média geral de 4,819 t ha⁻¹. Blanco et al. (2011) relatam produtividade de 7,62 t ha⁻¹ de espigas de milho sem palha.

Na Figura 13 são vistas as curvas de tendência descritas pelas médias da produtividade de espigas de milho verde sem palha, em relação à lâmina de água e quantidade de potássio aplicada, assim como as equações de regressão com seus respectivos R².

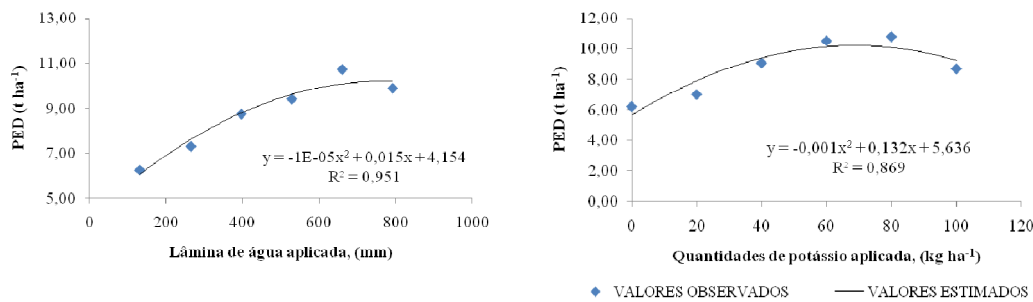


Figura 13. Gráfico da produtividade de espigas desempalhadas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Na Tabela 18 se observaram os modelos de regressão para as lâminas de água de irrigação e para a adubação com potássio, assim como R² de 0,951 e 0,869 das duas equações que predizem a PED em função da lâmina (W) e da adubação (K) respectivamente; as duas equações de regressão apresentam ótimos ajustes aos dados analisados com coeficientes de correlação muito bons.

Tabela 18. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a produtividade de espigas desempalhadas

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	PED = -0,00001 W ² + 0,015 W 4,154 , com R ² = 0,951
	PED_{max} = 9,78 t ha⁻¹ Para W = 750 mm
Potássio (K)	PED = -0,001 K ² + 0,132 K 5,636 , com R ² = 0,869
	PED_{max} = 9,99 t ha⁻¹ Para K = 66 Kg ha⁻¹

Pela regressão da fonte de variação lâmina é obtida uma PED máxima de 9,78 t ha⁻¹, com uma lâmina de água de 750 mm. Utilizando-se da equação de regressão da fonte de variação potássio, obtém-se PED máxima de 9,9 t ha⁻¹ com 66 kg ha⁻¹ de potássio na adubação.

5.3.5. Produtividade de espigas comerciais (PEC)

A lâmina de água, os quantitativos de potássio e a interação entre os dois fatores influenciaram, de forma significativa, a produtividade de espigas comerciais, mesmo que os dois

A média geral das espigas desempalhadas e discutida anteriormente, foi de 8,72 t ha⁻¹; deste quantitativo 7,7 t ha⁻¹ foram de espigas comerciais, ou seja, de espigas que apresentaram diâmetros superiores a 3 centímetros e comprimento maior que 15 centímetros. No geral, 88 % da produtividade de espigas satisfizeram os padrões de qualidade exigidos pelo mercado.

Tabela 19. Análise de variância da produtividade de espigas comerciais

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	510,53606	102,10721	36,2773**
Erro- W	18	50,66341	2,81463	
Parcelas	23	516,19946		
Potássio (K)	5	438,58613	87,71723	94,3477**
Int. W x K	25	61,96776	2,47871	2,6661*
Erro- K	90	83,67504	0,92972	
Total	143	1145,42840		

CVdas parcelas (W) = 21,83 %

CVdas subparcelas (K) = 12,55 %

Média geral = 7,7 t ha⁻¹

Nº de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < 0,01)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade (0,01 < p < 0,05)

^{ns} não significativo ao nível

As médias da produtividade de espigas comerciais, em que as fontes de variação foram as quantidades de água e de potássio, estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20. Valores médios, em tonelada por hectare, da produtividade de espigas comerciais, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (t ha ⁻¹)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	2,08	3,00	4,42	7,07	6,43	5,31	4,72
W ₂ - 264	3,44	4,50	6,16	6,94	8,58	5,63	5,87
W ₃ - 396	4,82	5,91	8,30	9,38	9,50	8,09	7,67
W ₄ - 528	5,88	9,32	9,84	10,50	10,27	8,16	8,99
W ₅ - 660	8,12	6,78	10,12	12,34	13,58	10,64	10,26
W ₆ - 792	5,92	6,25	8,86	9,90	11,78	8,84	8,59
Médias (t ha⁻¹)	5,04	5,96	7,95	9,35	10,02	7,78	

Semelhante ao que ocorreu nos parâmetros anteriormente discutidos, a combinação W₅K₄ resultou na maior produtividade de espigas comerciais. Com 13,58 t ha⁻¹, a maior média de PEC superou a menor produtividade (W₁K₀ = 2,08 t ha⁻¹) em 6,53 vezes. Nas médias gerais dentro dos quantitativos de potássio a produtividade variou de 504 a 10,02 t ha⁻¹, nas adubações com potássio de 0 e 80 kg ha⁻¹, respectivamente. As médias de produtividade de espigas comerciais foram analisadas, dentro das lâminas de água, a produtividade variou de 4,72 a 10,26 t ha⁻¹, nas lâminas de água de 132 e 660 mm, respectivamente.

Estudos realizados por Albuquerque et al. (2008) conseguiram produtividade de espigas comerciais de 4,35 t ha⁻¹, em condições de aporte hídrico e nutricional adequado. Moraes et al. (2010)

obtiveram uma produtividade de espigas comerciais de $6,36 \text{ t ha}^{-1}$, para a cultivar AG 1051. Comparando os dados dessa pesquisa com os dos referidos autores, observa-se uma superioridade nas médias obtidas no presente experimento, o que aponta para um ganho de massa de milho verde comercializável, em decorrência dos tratamentos em questão.

As curvas de tendência descritas pelas médias da produtividade de espigas comerciais em relação à lâmina de água e quantidade de potássio aplicada, tal como as equações de regressão com seus respectivos R^2 , são vistas na Figura 14.

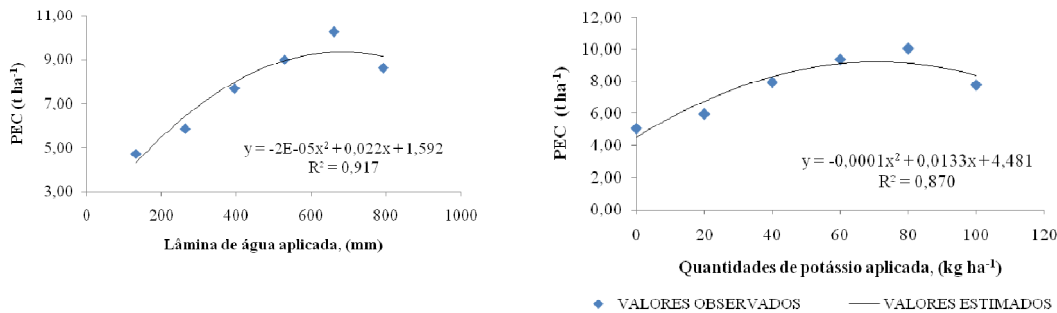


Figura 14. Gráfico da produtividade de espigas comerciais dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Ao observar os modelos de regressão para as lâminas de água de irrigação e para adubação com potássio, assim como R^2 de 0,917 e 0,870 das duas equações que predizem a PEC em função da lâmina (W) e da adubação (K), respectivamente, infere-se que as duas equações de regressão apresentam ótimos ajustes aos dados analisados (Tabela 21).

Tabela 21. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a produtividade de espigas comerciais

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	PEC = $-0,000017 W^2 + 0,02269 W + 1,592$, com $R^2 = 0,917$
	PEC _{max} = 9,1631 t ha⁻¹ Para W = 667 mm
Potássio (K)	PEC = $-0,0001 K^2 + 0,0133 K + 4,481$, com $R^2 = 0,870$
	PEC _{max} = 4,923 t ha⁻¹ Para K = 66,5 Kg ha⁻¹

Da regressão da fonte de variação lâmina obtém-se PEC máxima de $7,64 \text{ t ha}^{-1}$, com uma lâmina de água de 550 mm. Valendo da equação de regressão da fonte de variação potássio, verifica-se PEC máxima de $4,92 \text{ t ha}^{-1}$ com $66,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de potássio na adubação.

5.3.6. Percentagem de espigas comerciais (% EC)

As fontes de variação, lâmina de água, quantitativos de potássio e a interação entre os dois fatores influenciaram, de forma significativa, a percentagem de espigas comerciais, a nível de 1% de probabilidade. (Tabela 22)

Pelos coeficientes de variação (CV) das parcelas de 1,26 % e das subparcelas de 1,34 %, pode-se classificar tanto as parcela como as subparcelas, com baixo erro experimental, segundo critérios

Tabela 22. Análise de variância da percentagem de espigas comerciais

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	8383,43902	1676,68780	1422,8962**
Erro- W	18	21,21053	1,17836	
Parcelas	23	8404,64955		
Potássio (K)	5	2502,56463	500,51293	377,3803**
Int. W x K	25	297,39308	11,89572	8,9692**
Erro- K	90	119,36545	1,32628	
Total	143	11323,97270		

CVdas parcelas (W) = 1,26 %

CVdas subparcelas (K) = 1,34 %

Média geral = 86,2 %

Nº de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$)

^{ns} não significativo ao nível

Na Tabela 23 se encontram os valores médios obtidos para percentagem de espigas comerciais em função dos tratamentos das lâminas de água aplicadas e da adubação com potássio.

Tabela 23. Valores médios, em percentagem, da percentagem de espigas comerciais, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (%)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	67,98	70,12	74,00	75,21	80,07	78,38	74,29
W ₂ - 264	72,87	73,90	78,25	81,48	88,05	82,33	79,48
W ₃ - 396	80,07	84,18	86,50	89,53	92,36	89,92	87,09
W ₄ - 528	87,15	92,79	97,00	98,10	100,00	95,05	95,01
W ₅ - 660	89,03	94,46	97,40	97,56	97,47	96,22	95,36
W ₆ - 792	77,81	82,58	84,50	87,40	94,32	90,23	86,14
Médias (%)	79,15	83,01	86,27	88,21	92,04	88,69	

Pelas médias dos percentuais de espigas comerciais da Tabela 23, verifica-se alto percentual de espigas comerciais, mesmo nos menores %EC (67,89 %) semelhante aos resultados obtidos por Moraes et al. (2010) com 79 % de espigas da cultivar AG 1051 comercializáveis e superando Albuquerque et al. (2008) que obtiveram 54,63 % de espigas comerciais.

Na Figura 15, observam-se as curvas de tendência, descritas pelas médias do percentual de espigas comerciais em relação à lâmina de água e quantidade de potássio aplicada e as equações de regressão com seus respectivos R².

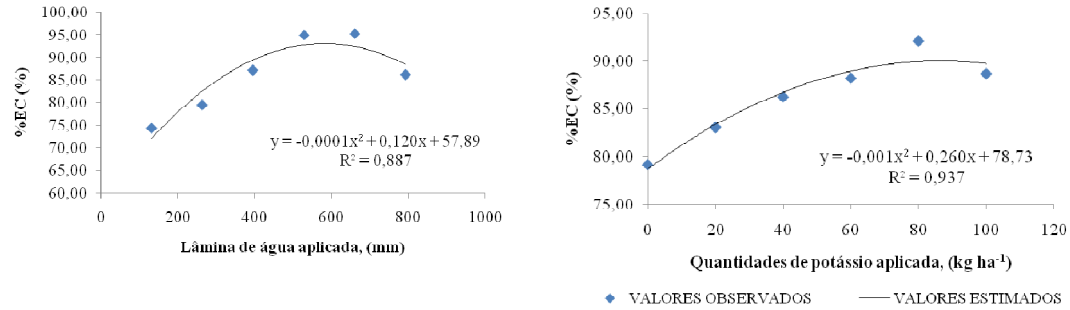


Figura 15. Gráfico da percentagem de espigas comerciais dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Ao observar os modelos de regressão para as lâminas de água de irrigação e para adubação com potássio, assim como R^2 de 0,887 e 0,937 das duas equações que predizem a % EC em função da lâmina (W) e da adubação (K), respectivamente, pode-se inferir que as duas equações de regressão apresentam ótimos ajustes aos dados analisados (Tabela 24).

Tabela 24. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a percentagem de espigas comerciais

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	$\%EC = -0,0001 W^2 + 0,120 W + 57,890$, com $R^2 = 0,887$ $\%EC_{\max} = 93,89$ % Para $W = 600$ mm
Potássio (K)	$\%EC = -0,001 K^2 + 0,260 K + 78,730$, com $R^2 = 0,937$ $\%EC_{\max} = 95,63$ % Para $K = 130$ Kg ha ⁻¹

Com a regressão em que a fonte de variação era a lâmina, obtém-se % EC máxima de 93,89 %, com uma lâmina de água de 600 mm. Utilizando a equação de regressão da fonte de variação potássio, verifica-se % EC máxima de 95,63 % com 130 kg ha⁻¹ de potássio na adubação.

5.3.7. Percentagem de massa de grãos do milho verde (% MG)

Ante a análise de variância (Tabela 25) a lâmina de água, os quantitativos de potássio e a interação entre os dois fatores, influenciaram de forma significativa a percentagem de grãos do milho verde, a nível de 1% de probabilidade.

Tomando-se como base os coeficientes de variação (CV) das parcelas de 2,99 % e das subparcelas de 2,77 %, tanto as parcelas como as subparcelas podem ser enquadradas na classificação de baixo erro experimental, segundo Pimentel-Gomes (1985).

Tabela 25. Análise de variância da percentagem de massa de grãos do milho verde

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	8045,96508	1609,19302	652,4709**
Erro- W	18	44,39351	2,46631	
Parcelas	23	8090,35859		
Potássio (K)	5	2555,19079	511,03816	242,7411**
Int. W x K	25	383,75860	15,35034	7,2914**
Erro- K	90	189,47526	2,10528	
Total	143	11218,78324		

CVdas parcelas (W) = 2,99 %
 CVdas subparcelas (K) = 2,77 %
 Média geral = 52,4 %
 N° de Observações= 144

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$)

^{ns} não significativo ao nível

Os valores médios obtidos para percentagem de massa de grãos do milho verde em função dos tratamentos das lâminas de água aplicadas e da adubação com potássio se encontram na Tabela 26.

Tabela 26. Valores médios, em percentagem, da percentagem de massa de grãos do milho verde, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (%)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	33,93	35,61	40,18	41,04	46,21	46,41	40,56
W ₂ - 264	38,93	41,50	44,49	47,47	54,29	48,34	45,84
W ₃ - 396	46,16	50,18	52,57	59,92	58,39	55,38	53,77
W ₄ - 528	53,31	59,44	62,94	63,87	65,96	61,15	61,11
W ₅ - 660	55,08	58,81	63,29	63,61	63,47	61,87	61,02
W ₆ - 792	44,75	48,42	50,49	53,27	60,37	56,64	52,32
Médias (%)	45,36	48,99	52,33	54,86	58,12	54,96	

As médias da percentagem de massa de grãos no milho verde obtidas, variaram de 33,93% a 65,93% nas combinações W₁K₀ e W₄K₄, respectivamente. Ao observar as médias dentro das lâminas de irrigação, identifica-se que na lâmina de 132 mm a média geral foi de 40,56%, obtendo-se um máximo de 61,11% (acréscimo de 33,63% na percentagem de massa de grãos) na lâmina de água de 528 mm que representava a reposição de 100% da evapotranspiração da cultura. Referenciando-se as médias dentro das adubações, verifica-se que nos tratamentos K₀ a % MG foi de 45,36 %; já nos tratamentos K₄ a % MG, foi de 58,12 %, ou seja, um acréscimo de 21,95 % da percentagem de massa de grãos do tratamento K₀ para o tratamento K₄.

Os valores médios na percentagem de massa de grãos dentro de cada lâmina de água aplicada, tenderam a crescer à medida em que o nível de água aumentou, até a reposição de 100% da ET_{pc} e a partir deste nível de reposição a % MG começou a decair. O aumento de uma lâmina para outra foi de 11,61% (W₁ para W₂); 14,74% (W₂ para W₃); 12,0 % (W₃ para W₄); a partir deste ponto começou a existir decréscimo de 0,15% (W₄ para W₅) e de 14,26% (W₅ para W₆).

Os efeitos do déficit hídrico na fisiologia do milho, são vistos no desenvolvimento dos órgãos florais masculinos e na germinação do pólen, fazendo com que ocorra redução do número de grãos por espiga (HERRERO & JOHNSON, 1981; MAGALHÃES, et al., 2002; BERGAMASCHI et al., 2004). Para Schussler & Westgate (1991b.) essa redução de grãos por espigas, em plantas com déficit hídrico, se deve à baixa taxa de suprimento de assimilados aos ovários, provocando abortamento. Com o discutido, pode-se explicar as médias mais baixas da percentagem de massa de grãos nas plantas cujos tratamentos dispunham de menores lâminas de água na irrigação (sob déficit hídrico).

Comparando os acréscimos decorrentes da variação de água com os acréscimos decorrentes da variação de potássio, observa-se que a água apresenta maior impacto no ganho de massa dos grãos de milho, visto que os efeitos hídricos interferem diretamente na produção de grãos.

A Figura 16 representa as curvas de tendência descritas pelas médias da percentagem de massa de grãos do milho verde em relação à lâmina de água e à quantidade de potássio aplicada, assim como as equações de regressão com seus respectivos R^2 .

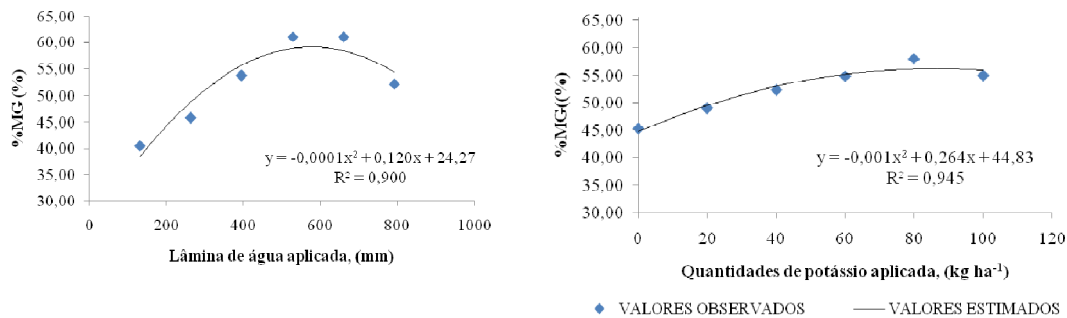


Figura 16. Gráfico da percentagem de massa de grãos do milho verde dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Pelos modelos de regressão para as lâminas de água de irrigação e para adubação com potássio, pode-se inferir que as duas equações de regressão apresentam ótimos ajustes aos dados analisados, visto que o R^2 de 0,900 e de 0,945 das duas equações que predizem a % MG em função da lâmina (W) e da adubação (K) são, respectivamente, altos (Tabela 27).

Tabela 27. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam percentagem de massa de grãos do milho verde

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	$\%MG = -0,0001 W^2 + 0,120 W + 24,270$, com $R^2 = 0,900$
	$\%MG_{\max} = 60,27$ % Para $W = 600$ mm
Potássio (K)	$\%MG = -0,001 K^2 + 0,264 K + 44,830$, com $R^2 = 0,945$
	$\%MG_{\max} = 62,25$ % Para $K = 132$ Kg ha ⁻¹

Pela equação de regressão com a fonte de variação como a lâmina de água, obtêm-se % MG máxima de 60,27 %, com uma lâmina de água de 600 mm. Utilizando-se a equação de regressão da fonte de variação potássio verifica-se % MG máxima de 62,25 % com 132 kg ha⁻¹ de potássio na adubação.

5.4. Variáveis de produção da planta

5.4.1. Massa verde da planta, juntamente com as espigas (MVPce)

A massa verde da planta, juntamente com as espigas de milho, foi influenciada significativamente pelos fatores lâminas de água adubação potássica e pela interação entre os dois fatores referidos, a nível de 1% de probabilidade, pelo teste F, conforme Tabela 28.

Os coeficientes de variação nas parcelas e nas subparcelas de 2,22 e de 3,46 %, respectivamente, foram considerados de baixo erro experimental, segundo Pimentel-Gomes (1985).

Tabela 28. Análise de variância da massa verde da planta, juntamente com as espigas

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	6329,05262	1265,81052	119,3371**
Erro- W	18	190,92630	10,60702	
Parcelas	23	6519,97892		
Potássio (K)	5	4387,67755	877,53551	188,1272**
Int. W x K	25	3584,47505	143,37900	30,7378**
Erro- K	90	419,81270	4,66459	
Total	143	14911,94220		

CVdas parcelas (W) = 5,22 %

CVdas subparcelas (K) = 3,46 %

Média geral = 62,4 t ha⁻¹

Nº de Observações= 144

** significativo a nível de 1% de probabilidade (p < 0,01)

* significativo a nível de 5% de probabilidade (0,01 < p < 0,05)

^{ns} não significativo

A média geral observada em todo o experimento, foi de 62,4 t ha⁻¹ numa população de aproximadamente 56 mil plantas por hectare. Restle et al. (2002) conseguiram, estudando silagem de milho para alimentação de bovinos, massa verde da planta, juntamente com as espigas de milho na ordem de 33,564 t ha⁻¹ na cultivar AG 5011, montante que representa 53,79% da produção obtida na presente pesquisa; contudo, os referidos autores não relataram a população de plantas no experimento.

Os valores médios da massa verde da planta, juntamente com as espigas (MVPce), em função das lâminas de água e da adubação com potássio, estão representados na Tabela 29.

Tabela 29. Valores médios, em toneladas por hectare, da massa verde da planta juntamente com as espigas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (t ha ⁻¹)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	42,83	45,24	51,13	53,90	56,22	53,51	50,47
W ₂ - 264	43,93	54,22	59,08	71,18	69,57	52,79	58,46
W ₃ - 396	44,90	50,25	62,40	76,26	68,50	67,75	61,67
W ₄ - 528	51,44	72,60	69,64	64,01	69,05	66,26	65,50
W ₅ - 660	63,11	68,09	69,79	71,67	74,01	75,05	70,29
W ₆ - 792	63,47	64,43	73,44	62,08	66,67	79,05	68,19
Médias (t ha ⁻¹)	51,61	59,14	64,24	66,52	67,34	65,74	

A produtividade média de matéria verde de milho para ensilagem é de 25 a 30 t ha⁻¹ (AGUIAR et al., 1993). Entretanto, Carvalho et al. (1996) relataram produção de 31,25 a 47,26 toneladas de matéria verde por hectare. As médias de 42,83 e de 79,05 t ha⁻¹, nas combinações de W₁K₀ e W₆K₅, respectivamente, numa população de 56.000 plantas, obtiveram rendimento médio por planta de 0,765 a 1,41 kg, valores semelhantes aos obtidos por Beleze et al. (2003) que obtiveram médias de 42,18 a 47,93 t ha⁻¹ de massa verde de plantas cuja massa individual de plantas era de 0,712 a 0,925 kg.

A quantidade de biomassa produzida pelo vegetal pode ser definida por uma relação fisiológica simples, baseada na quantidade de radiação interceptada e em sua eficiência de conversão em matéria seca (CHARLES-EDWARDS, 1982). Muchow (1989) observou que o decréscimo da produção de biomassa em milho, sorgo e milheto, em resposta ao déficit hídrico, está mais associado à redução da eficiência da radiação do que à redução da interceptação da radiação.

As médias da MVPce dentro das lâminas de água variaram 50,47 a 70,29 t ha⁻¹ para 132 e 660 mm de água; dentro da adubação com potássio as médias de MVPce variaram de 51,61 a 67,34 t ha⁻¹ nos tratamentos K₀ e K₄, respectivamente.

As curvas de tendência descritas pelas médias da massa verde das plantas juntamente com as espigas em relação à lâmina de água e à quantidade de potássio aplicada, tal como também as equações de regressão com seus respectivos R², estão representadas graficamente na Figura 17.

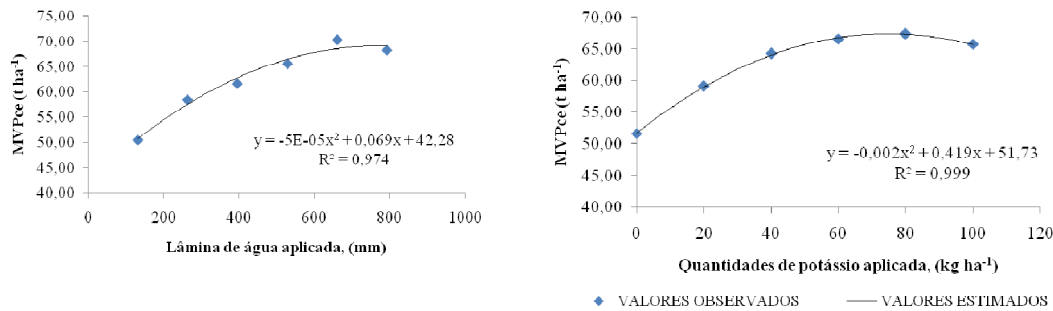


Figura 17. Representação gráfica da massa verde da planta, juntamente com as espigas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio, aplicadas na produção do milho verde

Os modelos de regressão que predizem a MVPce em função da lâmina (W) e da adubação (K), para as lâminas de água de irrigação e para adubação com potássio, assim como R² de 0,974 e 0,999 das duas equações, apresentam ótimos ajustes aos dados analisados (Tabela 30).

Tabela 30. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a massa verde da planta, juntamente com as espigas

Fonte de variação	Modelo de Regressão
Lâmina (W)	MVPce = -0,00005 W ² + 0,069 W 42,280 , com R ² = 0,974
	MVPce _{max} = 66,09 t ha⁻¹ Para W = 690 mm
Potássio (K)	MVPce = -0,002 K ² + 0,419 K 51,730 , com R ² = 0,999
	MVPce _{max} = 73,68 t ha⁻¹ Para K = 104,75 Kg ha⁻¹

Com a regressão em que a fonte de variação era a lâmina, obtém-se MVPce máxima de 66,09 t ha⁻¹, com uma lâmina de água de 690 mm. Utilizando-se a equação de regressão da fonte de variação potássio, verifica-se MVPce máxima de 73,68 t ha⁻¹ com 104,75 kg ha⁻¹ de potássio na adubação.

5.4.2. Massa verde da planta sem as espigas (MVPse)

A análise de variância da massa verde da planta sem as espigas, teve influência significativa a nível de 1% de probabilidade, pelo teste F, dos fatores lâmina de água, potássio e da interação entre esses fatores. (Tabela 31)

Coefficientes de variação de 9,24 e de 5,56 % nas parcelas compostas pelas diferentes lâminas de água aplicadas e nas subparcelas compostas pelos quantitativos de potássio, respectivamente que, segundo Pimentel-Gomes (1985), caracteriza erro experimental de baixa magnitude.

Tabela 31. Análise de variância da massa verde da planta sem as espigas

FV	GL	SQ	QM	F
Lâmina (W)	5	2796,60356	559,32071	27,2203**
Erro- W	18	369,86286	20,54794	
Parcelas	23	3166,46642		
Potássio (K)	5	1621,18637	324,23727	43,5790**
Int. W x K	25	3325,85817	133,03433	17,8805**
Erro- K	90	669,61899	7,44021	
Total	143	8783,12996		

CVdas parcelas (W) = 18,39 %
 CVdas subparcelas (K) = 15,33 %
Média geral = 49,1 t ha⁻¹
Nº de Observações= 144

** significativo a nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo a nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$)

^{ns} não significativo

Visto que a média geral obtida no experimento foi de 49,1 t ha⁻¹, os valores da massa verde da planta sem espigas em cada tratamento, podem ser vistos na Tabela 32.

Tabela 32. Valores médios, em toneladas por hectare, da massa verde da planta sem as espigas, em função das lâminas de água e da adubação com potássio

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha ⁻¹						Médias (t ha ⁻¹)
	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
	0	20	40	60	80	100	
W ₁ - 132	37,85	38,29	41,88	39,24	44,03	42,93	40,70
W ₂ - 264	36,70	44,65	48,25	58,08	54,26	42,27	47,37
W ₃ - 396	35,71	39,53	47,46	60,20	52,72	53,89	48,25
W ₄ - 528	41,07	57,40	54,12	47,59	53,30	53,09	51,09
W ₅ - 660	49,13	57,09	53,84	52,28	52,81	58,09	53,88
W ₆ - 792	51,78	52,81	57,38	44,72	47,56	64,00	53,04
Médias (t ha⁻¹)	42,04	48,30	50,49	50,35	50,78	52,38	

Pelo desdobramento das médias de MVPse obtidos na lâminas de água dentro dos quantitativos de potássio, avalia-se que; a medida em que as lâminas de água foram aumentando 14,08 % (W₁ para W₂), 1,82 % (W₂ para W₃), 5,56 % (W₃ para W₄), 5,28 % (W₄ para W₅) a partir deste ponto começou a existir decréscimo de 1,55 % (W₅ para W₆). Quando o quantitativo de potássio foi aumentando também, observou-se aumento da MVPse, nas taxas de 12,96 % (K₀ para K₁), 4,34 % (K₁ para K₂), 0,85 % (K₃ para K₄), 3,05 % (K₄ para K₅) com pequeno decréscimo de 0,28 % (K₂ para K₃).

A melhor combinação para MVPse foi W_6K_5 com média de 64 t ha^{-1} , e a menor média foi observada na combinação W_3K_0 com $35,71 \text{ t ha}^{-1}$, numa população de 56000 plantas por hectare.

O acúmulo de matéria seca vegetal é o resultado do mecanismo fotossintético, o qual incorpora matéria orgânica à planta. Assim sendo, todo e qualquer fator que interfira na fotossíntese afetará o acúmulo de matéria seca. Fatores como nutrição mineral, radiação e disponibilidade hídrica, interferem significativamente na fotossíntese. Dentre esses, a disponibilidade de água desempenha papel preponderante pois, além de propiciar a entrada de CO_2 , ela promove o resfriamento do vegetal interferindo, desta forma, na taxa de fotossíntese e de respiração (CHARLES-EDWARDS, 1982).

As curvas de tendência descritas pelas médias da massa verde das plantas sem as espigas, em relação à lâmina de água e à quantidade de potássio aplicada, assim como as equações de regressão com seus respectivos R^2 , estão representadas graficamente na Figura 18.

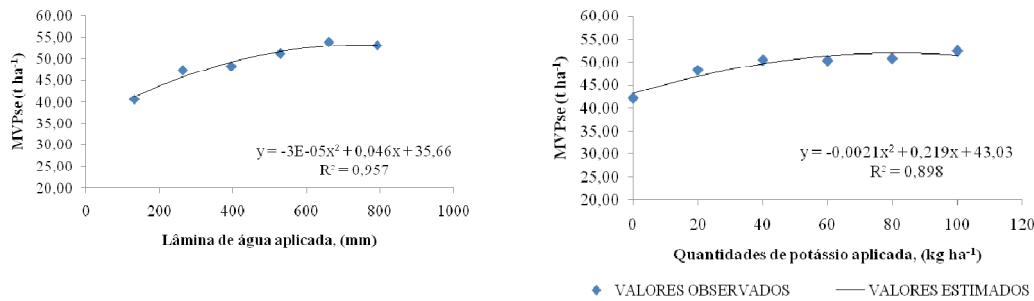


Figura 18. Representação gráfica da massa verde da planta sem as espigas dentro das lâminas de água e das quantidades de potássio aplicadas na produção do milho verde

Os modelos de regressão que predizem a MVPse em função da lâmina (W) e da adubação (K), para as lâminas de água de irrigação e para adubação com potássio, assim como R^2 de 0,957 e 0,898 das duas equações, apresentam ótimos ajustes aos dados analisados (Tabela 33).

Tabela 33. Modelos de regressão com a lâmina de água e adubação potássica que maximizam a massa verde da planta sem as espigas

Fonte de variação		Modelo de Regressão	
Lâmina (W)	MVPse	$= -0,00003 W^2 + 0,046 W + 35,660$, com $R^2 = 0,957$
	MVPse _{max}	$= 53,29 \text{ t ha}^{-1}$	Para $W = 766,7 \text{ mm}$
Potássio (K)	MVPse	$= -0,0021 K^2 + 0,219 K + 43,030$, com $R^2 = 0,898$
	MVPse _{max}	$= 48,74 \text{ t ha}^{-1}$	Para $K = 52,1 \text{ Kg ha}^{-1}$

Pela equação de regressão em que a fonte de variação era a lâmina, obtém-se MVPse máxima de $53,29 \text{ t ha}^{-1}$, com uma lâmina de água de $766,6 \text{ mm}$. Utilizando a equação de regressão cuja fonte de variação era potássio, verificou-se MVPse máxima de $48,74 \text{ t ha}^{-1}$ com $52,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de potássio na adubação.

5.4.3. Eficiência no uso da água (EUA)

Como já comentada, a eficiência no uso da água, na literatura internacional é normalmente analisada em toneladas de produto por mega litros de água utilizada (t ML^{-1}) e em kg de produto por metro cúbico de água utilizada (kg m^{-3}) mas para facilitar a análise econômica da irrigação, os dados de

EUA também podem ser interpretados com base no consumo de água, expresso em milímetros de água consumida por tonelada de milho verde produzida (mm t^{-1}).

5.4.3.1. Eficiência no uso da água na produção de espigas comerciais (EUAec)

Nos resultados apresentados na Tabela 34 observa-se que a quantidade de água consumida por tonelada de espigas comerciais de milho verde produzidas, aumenta sempre que as lâminas de reposição de água são diferenciadas. O consumo de água para produção de uma tonelada de espigas de milho comerciais nas lâminas de 132, 264, 396, 528, 660, e 792 mm de água, dentro de todos os tratamentos de adubação potássica, foi de $34,4 \text{ mm t}^{-1}$ ($3,6 \text{ kg m}^{-3}$), $49,9 \text{ mm t}^{-1}$ ($2,2 \text{ kg m}^{-3}$), $56,3 \text{ mm t}^{-1}$ ($1,9 \text{ kg m}^{-3}$), $61,6 \text{ mm t}^{-1}$ ($1,7 \text{ kg m}^{-3}$), $68,6 \text{ mm t}^{-1}$ ($1,6 \text{ kg m}^{-3}$) e $99,8 \text{ mm t}^{-1}$ ($1,1 \text{ kg m}^{-3}$), respectivamente. Esses resultados indicam que a EUA diminui com o aumento da quantidade de água aplicada via irrigação.

Tendência semelhante também foi observada por alguns autores, em cultura da cana-de-açúcar. A exemplo de Singh et al. (2007), na Índia subtropical, ao constatarem que a cana-de-açúcar irrigada com apenas 25% da evaporação do tanque classe "A" (EV) produziu $78 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ($12,8 \text{ mm t}^{-1}$) e, ao irrigar com 125 % da EV, a EUA baixou para $59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, equivalente a $16,9 \text{ mm t}^{-1}$. Wiedenfeld & Enciso (2008) observaram, no sul do Texa – USA, avaliando os valores de 1,00, 1,25 e 1,50 para o kc máximo (equivalente a 100, 125 e 150 % da ETo) da cana-de-açúcar uma EUA em cana-planta de 8,0, 7,5 e 6,0 Mg ML^{-1} (equivalente a 12,50, 13,33 e 16,67 mm t^{-1}), respectivamente e em cana-soca a EUA foi 9,4, 8,1 e 7,7 Mg ML^{-1} (equivalente a 10,64, 12,34 e 12,99 mm t^{-1}).

Tabela 34. Médias da eficiência no uso da água para a produção de espigas de milho verde comerciais

Lâmina W (mm)	Quantitativos de potássio (K) em kg ha^{-1}												Médias	
	K ₀ - 0		K ₁ - 20		K ₂ - 40		K ₃ - 60		K ₄ - 80		K ₅ - 100			
	mm t^{-1}	kg/ m^3	mm t^{-1}	kg/ m^3	mm t^{-1}	kg/ m^3	mm t^{-1}	kg/ m^3	mm t^{-1}	kg/ m^3	mm t^{-1}	kg/ m^3	mm t^{-1}	kg/ m^3
W₁- 132	64,2	1,6	44,1	2,3	31,1	3,3	19,5	5,4	21,0	4,9	26,5	4,0	34,4	3,6
W₂- 264	77,0	1,3	61,6	1,7	43,8	2,3	38,2	2,6	31,6	3,2	47,0	2,1	49,9	2,2
W₃- 396	83,7	1,2	71,7	1,5	48,1	2,1	42,3	2,4	41,9	2,4	50,0	2,0	56,3	1,9
W₄- 528	90,1	1,1	57,5	1,8	54,0	1,9	50,7	2,0	51,6	1,9	65,4	1,5	61,6	1,7
W₅- 660	81,4	1,2	99,3	1,0	65,2	1,5	53,8	1,9	49,6	2,1	62,4	1,6	68,6	1,6
W₆- 792	140,3	0,7	128,2	0,8	90,3	1,1	81,1	1,3	67,9	1,5	90,9	1,1	99,8	1,1
Médias	89,4	1,2	77,1	1,5	55,4	2,0	47,6	2,6	43,9	2,7	57,0	2,1		

Analisando as médias dentro da adubação potássica, observa-se um aumento de EUAec até o tratamento K₄ (correspondendo à adubação potássica de 80 kg ha^{-1} , o dobro da recomendada pela análise de solo) sendo produzido $1,2 \text{ kg m}^{-3}$, em K₀, até $2,7 \text{ kg}$ de espigas comerciais por metros cúbicos de água, em K₄. No tratamento seguinte, K₅ com adubação potássica de 100 kg ha^{-1} , as plantas necessitaram de mais água para produzir a mesma quantidade de espigas comerciais, 57 mm t^{-1} ($2,1 \text{ kg m}^{-3}$). Esta peculiaridade pode ser explicada pelo fator de desproporcionalidade causada pelo provável excesso de potássio na rizosfera das plantas, submetidas ao tratamento K₅. Pela "Lei do mínimo" de Liebig, todos os nutrientes têm que estar disponíveis para a planta, na quantidade e na proporção ideais. Se eles não estiverem disponíveis nesta proporção, não será atingida a produtividade esperada e a produção será limitada pelo elemento que está presente em quantidade proporcionalmente menor, caso em que, mesmo se aumentar a concentração dos demais nutrientes, não haverá um aumento da produtividade. Como a adubação de fósforo e nitrogênio foi constante para todos os tratamentos, a referida desproporcionalidade pode ter ocorrido, causando diminuição da eficiência no uso da água,

pelas plantas. Contudo, tal hipótese só poderia ter sido comprovada mediante análises fisiológicas de nutrição vegetal, o que foge ao foco desta pesquisa.

Bozkurt et al. (2011) observaram, conduzindo estudos sobre os efeitos da irrigação com diferentes níveis de água na cultura do milho, em Hatay, Turquia (36°04'N, 35°57'E, 3 m acima do mar), eficiência no uso da água para a produção de grãos de 0,53 a 1,77 kg m⁻³, em quantitativos de água aplicada às plantas de 182 a 508 mm, respectivamente. Karimi & Gomrokchi (2011) obtiveram, avaliando a eficiência no uso da água em sistemas de irrigação por sulcos, em Ghazvin, Iran (36°15'N, 49°54'E), uma EUA na produção de grãos de milho entre 0,92 e 1,96 kg m⁻³.

5.5. Análise econômica dos custos de produção

5.5.1. Modelo contendo um único fator como variável independente

Resgatando as funções de produtividade de espigas comerciais (item 5.3.5), observa-se que o modelo quadrático foi o que apresentou o melhor R², sendo significativo portanto, a nível de 5 % de probabilidade (Tabela 35).

Tabela 35. Variáveis do modelo polinomial da produtividade de espigas comerciais

Fonte de Variação	Coeficientes	Modelo polinomial			R ²	QM	Teste F	Prob > F
		PEC= a + b X + c X ²						
		Valor	Teste T	Prob > T				
Lâmina de água (W)	a	1,594	0,432	0,0068	0,92	75,19	0,736	0,043*
	b	0,02269	1,241	0,0026				
	c	-0,000017	-0,858	0,0043				
Quantitativo de potássio (K)	a	4,481	3,872	0,0117	0,87	2920,2	1,742	0,0244*
	b	0,013	1,627	0,0164				
	c	-0,001	-1,32	0,0024				

* significativo ao nível de 5% de probabilidade (0,01 < p < 0,05)

5.5.2. Determinação dos pontos de máximo rendimento físico e líquido

O preço de comercialização das espigas desempalhadas, foi de 1,80 R\$ kg⁻¹ (1800 R\$ t⁻¹), e os custos da água e do potássio foram, respectivamente, 0,3166 R\$ mm⁻¹ e 3,30 R\$ kg⁻¹ de potássio aplicado.

A lâmina de água que proporcionou a máxima produtividade de espigas comerciais (PEC), ou seja, a máxima produtividade física (Wm) foi de 667 mm, sendo estimada uma PEC de 9163,1 kg ha⁻¹. A lâmina que proporcionou a maior receita líquida (W*) foi de 662 mm, que refletia numa PEC de 9162,7 kg ha⁻¹. Com base nesses resultados observa-se que a diferença entre a PEC, às vezes produzida com Wm, ora com W*, foi de apenas 0,4 kg ha⁻¹.

Para obtenção do rendimento físico máximo da PEC é gasto 1,58 R\$ ha⁻¹ a mais do que quando se trabalha com lâmina que proporcionou a maior receita líquida (W*). Salienta-se, ainda, que o incremento no lucro representa apenas 0,72 R\$ ha⁻¹. Um apelo fundamental para a adoção da W* reside numa economia de água de 50 m³ ha⁻¹. Em sistemas de produção localizados em regiões áridas e semiáridas, é imprescindível a opção por práticas de otimização dos recursos hídricos, corroborando com El-Hendawy et al. (2008); Karimi & Gomrokchi (2011).

O quantitativo de potássio que proporcionou a máxima produtividade de espigas comerciais (PEC), ou seja, a máxima produtividade física (Km) foi de 66,5 kg ha⁻¹, sendo estimada uma PEC de 4923 kg ha⁻¹. O nível de potássio que proporcionou a maior receita líquida (K*) foi de 57,33 kg ha⁻¹, que refletia numa PEC de 4915 kg ha⁻¹, obtendo-se uma diferença na PEC, de 8 kg ha⁻¹, quando comparada com a das produtividades obtidas com Km e com K*.

O ganho de produção de 8 kg ha⁻¹ na PEC quando se utiliza adubação nos níveis de Km, não é justificado, haja vista que é necessário um quantitativo de 9,17 kg ha⁻¹ de adubação potássica a mais do que a obtida quando adotado K*, ou seja, teriam que ser gastos 30,26 R\$ ha⁻¹ a mais e o incremento de 8 kg ha⁻¹ na PEC, iria proporcionar apenas 14,4 R\$ ha⁻¹.

5.5.3. Determinação do modelo contendo dois fatores como variável dependente

O teste F da equação foi significativo a 1 % de probabilidade e o coeficiente de regressão (R²) com valor de 91,77 %, indica que essa função de produção tem ótimo ajuste para a produtividade de espigas comerciais, em relação às lâminas de água e aos níveis de potássio. O coeficiente *f* para interação dos fatores água e potássio, não foi significativo; contudo, o modelo foi escolhido para representar a função da produtividade de espigas comerciais aos diferentes níveis de água e potássio (Tabela 36).

Segundo Gomes & Conagin (1987) o coeficiente *A*₂₀ que rege a parte final das curvas de resposta da produtividade de culturas agrícolas a fatores de produção geradas por regressão do tipo polinomial do segundo grau, normalmente, não representam bem a realidade haja vista que, a partir de determinado ponto, essas curvas decrescem rapidamente, o que não ocorre na prática. Portanto, é comum esse coeficiente não ser significativo.

Tabela 36. Função polinomial da PEC e significância dos coeficientes

Coeficientes	Modelo polinomial			
	PEC (W,K)= A ₀₀ + A ₀₁ .K + A ₀₂ .K ² + A ₁₀ . W + A ₁₁ .W.K + A ₂₀ . W ²			
	Valor	Erro	Teste t	Prob > T
A ₀₀	-1,3527	1,0894	-1,2417	0,224 ^{ns}
A ₀₁	0,1279	0,0231	5,528	0,0001 **
A ₀₂	-0,0009	0,0002	-4,8877	0,0001 **
A ₁₀	0,0221	0,0044	5,0832	0,0001 **
A ₁₁	-1,66E-05	4,42E-06	-3,7622	0,0007**
A ₂₀	1,12E-05	2,50E-05	0,4473	0,6579 ^{ns}
R ²	0,9177			
R ² ajustado	0,8159			
QM	42,5792			
Teste F	32,0215			
Prob> F	0,0001**			

** significativo a nível de 1% de probabilidade (p < 0,01)

* significativo a nível de 5% de probabilidade (0,01 < p < 0,05)

^{ns} não significativo

5.5.4. Determinação do ponto de máximo rendimento físico e líquido para o modelo com duas variáveis independentes

Pela equação da produtividade de espigas comerciais com os dois fatores de produção água e potássio, observou-se que a PEC máxima é de 10,82 t ha⁻¹, mediante a aplicação de 680,64 mm de água e 72,14 kg ha⁻¹ de potássio. O valor da PEC de 10,8 t ha⁻¹ era observado quando adubava-se o solo com 71,13 kg ha⁻¹ de potássio e quando se aplicava uma lâmina de água de 674,70 mm, situação em que o lucro líquido era maximizado.

O aumento na produtividade de espigas comerciais (PEC) ao se irrigar com 680,64 mm e se adubar com 72,14 kg ha⁻¹ de potássio, era de 20 kg ha⁻¹, comparado com a da produtividade obtida com

aplicação de água a nível de 674,70 mm e 71,13 kg ha⁻¹ de potássio, observando-se o ganho financeiro líquido de R\$ 30,79, visto que o gasto com água e adubação era de R\$ 5,21.

Atentando-se para a otimização no uso da água, a lâmina de água W* (674,70 mm) proporciona economia de 59 m³ ha⁻¹, quando se trabalhava objetivando uma produtividade máxima (lâmina Wm de 680,64 mm).

5.5.5. Determinação da região factível

O nível de potássio de 68,1 kg ha⁻¹ representa, teoricamente, a adubação necessária para manter a produtividade de espigas comerciais (PEC), quando a lâmina de água na irrigação fosse nula, ou seja, K(W=0).

A quantidade de água necessária para manter a PEC nos tratamentos sem aplicação da adubação de potássio, era de 662,65 mm, ou seja, W(K=0).

5.5.6. Determinação da produtividade física marginal

Observam-se, na Tabela 37, os valores dos produtos físicos marginais da água e do potássio, os quais foram obtidos a partir da derivada da função de produção escolhida.

O produto marginal mostra o incremento no rendimento, ao se usar uma unidade adicional do fator considerado, água ou potássio. Percebe-se, por exemplo, que se o produtor utilizar 60 kg ha⁻¹ de potássio e 528 mm de água, o rendimento aumenta 5,14 kg ha⁻¹ para cada milímetro de água aplicada e 21,11 kg ha⁻¹ para cada kg de potássio aplicado.

Tabela 37. Produto físico marginal da água para as diferentes lâminas de água (valor superior) e produto físico marginal do potássio, para diferentes níveis de potássio

Potássio, kg ha ⁻¹	Lâminas de água, mm					
	132	264	396	528	660	792
	PFM_w, Kg ha⁻¹					
0	17,62	13,24	8,85	4,47	0,09	-4,29
20	17,84	13,46	9,08	4,69	0,31	-4,07
40	18,07	13,68	9,3	4,92	0,54	-3,85
60	18,29	13,91	9,52	5,14	0,76	-3,62
80	18,51	14,13	9,75	5,37	0,98	-3,4
100	18,74	14,36	9,97	5,59	1,21	-3,17
	PFM_k, Kg ha⁻¹					
0	129,48	130,96	132,44	133,91	135,39	136,87
20	91,88	93,36	94,84	96,31	97,79	99,27
40	54,28	55,76	57,24	58,71	60,19	61,67
60	16,68	18,16	19,64	21,11	22,59	24,07
80	-20,92	-19,44	-17,96	-16,49	-15,01	-13,53
100	-58,52	-57,04	-55,56	-54,09	-52,61	-51,13

O produto marginal da água não variou com a dose de potássio aplicada, o mesmo ocorrendo com o produto marginal do potássio, que não variou com a lâmina de água aplicada. Este fato se deve à não significância estatística de interação entre os fatores lâminas de água e quantidades de potássio na função de produção.

Os produtos marginais da água e do potássio diminuem à medida em que as lâminas de água e a quantidades de potássio aumentam, respectivamente. Ambos diminuem até atingir o valor zero, quando se dá o máximo rendimento. Nesta análise o produto marginal da água será zero quando a lâmina aplicada for igual a 680,64 mm; já o produto marginal do potássio atinge o valor zero com a aplicação de 72,14 kg ha⁻¹.

A partir do momento em que o produto marginal da água e o produto marginal do potássio se tornam negativos, evidencia-se queda no rendimento com a respectiva aplicação de maiores lâminas de água e doses de nitrogênio. A partir de então, se tornam antieconômicas as quantidades aplicadas dos dois fatores.

5.5.7. Taxa marginal de substituição

Apresentam-se na Tabela 38, os valores das taxas marginais de substituição (TMS) de água por potássio (TMS_{W/K}) e de potássio por água (TMS_{K/W}). Esta relação mede a quantidade de água ou de potássio que deve substituir uma unidade do outro fator, de modo a manter o mesmo nível de produtividade.

Tabela 38. Valor das taxas marginais de substituição (TMS) e de água por potássio (TMS_{W/K}) e de potássio por água (TMS_{K/W})

Potássio, kg ha	Lâminas de água, mm					
	132	264	396	528	660	792
	TMS _{W/K}					
0	-0,1361	-0,1011	-0,0668	-0,0334	-0,0006	0,0314
20	-0,1942	-0,1442	-0,0957	-0,0487	-0,0032	0,0410
40	-0,3328	-0,2454	-0,1625	-0,0838	-0,0089	0,0624
60	-1,0966	-0,7659	-0,4851	-0,2436	-0,0336	0,1505
80	0,8849	0,7268	0,5427	0,3255	0,0656	-0,2512
100	0,3202	0,2517	0,1795	0,1034	0,0230	-0,0621
	TMS _{K/W}					
0	-7,349	-9,895	-14,960	-29,956	-1538,545	31,872
20	-5,150	-6,936	-10,448	-20,517	-313,436	24,388
40	-3,005	-4,075	-6,154	-11,938	-112,299	16,033
60	-0,912	-1,306	-2,061	-4,106	-29,726	6,645
80	1,130	1,376	1,843	3,072	15,252	-3,981
100	3,123	3,974	5,572	9,675	43,550	-16,107

Quanto mais água e menos potássio forem usados para obtenção do mesmo nível de produtividade de espigas comerciais, mais difícil se torna substituir potássio por água.

A TMS_{W/K} é, inicialmente, negativa, indicando que a água está sendo substituída pelo potássio em proporções decrescentes. A partir do momento em que ela se torna positiva, ela se encontra em uma combinação antieconômica de água por potássio, pois a água passa a ser substituída pelo potássio em quantidades crescentes. Do mesmo modo, quando a TMS_{K/W} é negativa, mostra que o potássio está sendo substituído pela água em proporções decrescentes e a partir do momento em que ela se torna positiva, ela se encontra em uma combinação antieconômica de potássio por água.

Com base nos resultados desta pesquisa conclui-se que na região de Sumé, PB:

1. Os quantitativos de água e de potássio influenciaram significativamente a produção de milho verde;
2. O coeficiente de cultivo do milho variou de 0,69 a 1,214, quando as plantas apresentavam 4 folhas e no período das espigas verde, respectivamente;
3. A lâmina de água de irrigação de 660 mm e o nível de adubação potássica de 80 kg ha⁻¹ propiciaram, no geral, as maiores médias das variáveis produtivas das espigas de milho verde. As maiores percentagem de espigas comerciais e da massa de grãos, foram obtidas com a adubação de 80 kg ha⁻¹ e 528 mm de água.
5. O consumo de água para a produção de uma tonelada de espigas de milho comerciais nas lâminas de 132, 264, 396, 528, 660, e 792 mm de água, dentro de todos os tratamentos de adubação potássica, cresceu, indicando que a EUA diminui com o aumento da quantidade de água aplicada via irrigação;
6. Em geral, a função de 2º grau descreveu bem a produtividade de espigas comerciais;
7. A aplicação de 680,64 mm de água e 72,14 kg ha⁻¹ de potássio maximizou a produtividade física de espigas comerciais, obtendo-se PEC máxima de 10,82 t ha⁻¹;
8. Quando se aplicava uma lâmina de água de 674,70 mm e quando se adubava o solo com 71,13 kg ha⁻¹ de potássio, o lucro líquido era maximizado, obtendo-se PEC de 10,8 t ha⁻¹;

AGUIAR, C.G.A.; SOUZA, A.G.; VICENTE, D. OC 202– Variedade de milho. **Informe Técnico OCEPAR**, v.14, n.2, p.1-11, 1993.

AGUIAR, J. V. de. A função de produção na agricultura irrigada. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2005. 196p.

ALBUQUERQUE, C. J. B.; VON PINHO, R. G.; SILVA, R. Produtividade de híbridos de milho verde experimentais e comerciais. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 2, p. 69-76, 2008.

ALGOZIN, K.A.; BRALTS, V.F.; RITCHIE, J.T. Irrigation strategy selection based on crop yield, water, and energy use relationships: A Michigan example. **Journal of Soil and Water Conservation**, p.428-31. 1988.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. ; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 319p. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; FRIZZONE, J.A.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; RODRIGUES, B.H.N. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.2, p.301-305, 2001

ARAGÃO, C. A. **Avaliação de híbridos simples braquíticos de milho super doce (*Zea mays* L.) portadores do gene *shrunken-2* (*sh2sh2*) utilizando o esquema dialélico parcial**. 2002. 101 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

ARAÚJO, L.A.N.; FERREIRA, M.E. ; CRUZ, M.C.P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.8, p.771- 777, 2004.

BEGG, J. E. & TURNER, N. C. Crop Water deficits. **Advances in Agronomy**, v. 28, p. 161-217.1976.

BELEZE, J. R. F.; ZEOULA, L. M.; CECATO, U.; DIAN, P. H. M.; MARTINS, E. N.; FALCÃO, A. J. da S. Avaliação de cinco híbridos de milho (*Zea mays*, L.) em diferentes estádios de maturação. 1. Produtividade, características morfológicas e correlações. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, n.3, p.529-537, 2003.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS. p. 25-32. 1992.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G. COMIRAN, F. ; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.9, p.831-839, 2004.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa: Ed. UFV. 625p. 2006.

BLANCO, F.F.; CARDOSO, M. J.; FREIRE FILHO, F. R.; VELOSO, M. E. C.; NOGUEIRA, C. C. P.; DIAS, N. S. Milho verde e feijão-caupi cultivados em consórcio sob diferentes lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.46, n.5, p.524-530, 2011.

BOTTINI, P. R.; TSUNECHIARO, A.; COSTA, F. A. G. da. Potencialidade da “Safrinha” para produção de milho verde. In: SEMINÁRIO SOBRE A CULTURA DO MILHO “SAFRINHA”, 2., 1995, Assis. **Resumos...** Assis: IAC, 1995. p. 99-103.

- BOZKURT, S.; YAZAR, A.; MANSUROGLU, G. S. Effects of different drip irrigation levels on yield and some agronomic characteristics of raised bed planted corn. **African Journal of Agricultural Research**, v.6, n.23, p.5291-5300, 2011.
- CALHEIROS, C.B.M.; QUEIROZ, J.E.; FRIZZONE, J.A; PESSOA, P.C.S. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: água como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.7, p.509-515, 1996.
- CARDOSO, M. J.; CARVALHO, H. W. L.; RIVEIRO, V. Q. **Avaliação preliminar de variedades de milho para produção de espiga verde em sistema agrícola familiar**. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE INTERAMERICANO DE HORTICULTURA TROPICAL, 49., 2003, Fortaleza. Resumos... Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2003. p. 72. (Documentos, 67)
- CARVALHO, M.L.M.; MELO, W.C.M.; PAIVA, L.R. Avaliação de cultivares de milho para produção de silagem na região de Lavras-sul de Minas gerais. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 25., 1996, Londrina. **Anais...** Londrina: 1996. p.51.
- CAVALCANTI, V.A.L.B.; SENA, R.C.; COUTINHO, J.L.B. Controle das cochonilhas da palma forrageira. **Boletim IPA Responde**, n.39, p.1-2, 2001.
- CERETTA, C. A. & SILVEIRA, M. J. Manejo da fertilidade do solo para altas produtividades. In: CARLESSO, R. et al. (Ed.) **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria:UFSM, p.10-20, 2001.
- CHARLES-EDWARDS, D. A. **Physiological determinants of crop growth**. London : Academic Press,1982. 161 p.
- CLAASSEN, M. M. & SHAW, R. H. Water deficits effects on Corn. II: Grain components. **Agronomy Journal**, v. 62, p. 652-655. 1970.
- COELHO, A. M. & FRANÇA, E. G. **Nutrição e adubação do milho**. Embrapa milho e sorgo. <http://www.cnpms.embrapa.br/milho/deficiencia/deficiencia.html>. 12 Out. 2009.
- COSTA, C. T. F.; PEREIRA, L. G. R.; ANTOS, R. D.; NEVES, A. L. N.; ARAÚJO, G. G. L.; BARREIROS, D. C. ; ARAGÃO, A. S. L. **Produtividade e características agrônômicas de sete genótipos de milho na região do sub-médio do vale do São Francisco**. In: CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, V, Aracaju- SE, 2008.
- COUTO, L.; COSTA, E.F.; VIANA, R.T. **Avaliação e comportamento de cultivares de milho em diferentes condições de umidade no solo**. In: RESUMO DAS ATIVIDADES DE PESQUISA. Sete Lagoas: Centro-EMBRAPA, 1986. v.2, p.77-78.
- COX, W. J. Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 3, p.489-496, 1996.
- CRUZ, J. C.; MONTEIRO, J. A.; SANTANA, D. P.; GARCIA, J. C.; BAHIA, F. G. F. T. C.; SANS, L. M. A. ; PEREIRA FILHO, I. A. **Recomendações Técnicas para o cultivo do milho**. Brasília: EMBRAPA, 1997. 204 p.
- CUNHA, G. R. da; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. Balanço de energia em cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.1, p.1-14, 1996.
- DENMEAD, O. T. & SHAW, R. H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. **Agronomy Journal**, v. 52, p. 497-498. 1960.

- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome. FAO, 1977. 144p. (Irrigation and drainage, Paper 24).
- DOURADO NETO, D.; PALHARES, M. VIEIRA, P. A.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P.; ROMANO, M. R. Efeito da população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.3, p.63-77, 2003.
- EL-HENDAWY, S. E.; ABD EL-LATTIEF, E. A.; AHMED, M. S.; SCHMIDHALTER, U. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. **Agricultural Water Management**, v.95, p.836-844, 2008.
- EL-HENDAWY, S.E. & SCHMIDHALTER, U. Optimal coupling combinations between irrigation frequency and rate for drip-irrigated maize grown on sandy soil. **Agricultural Water Management**, v.97, p.439-448, 2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- ENGLISH, M.J. & NUSS, G.S. Designing for deficit irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.108, n.2, p.91-106, 1982.
- ENGLISH, M.J. & NAKAMURA, B.C. Effects of deficit irrigation and irrigation frequency on wheat yields. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.115, n.2, p.172-184, 1989.
- ENGLISH, M.J.; SOLOMON, K.H.; HOFFMAN, G.J. A paradigm shift in irrigation management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.128, n.5, p.267-277, 2002.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p.399-412, 1990.
- FANCELLI, A.L. & DOURADO NETO, D. **Milho: Fisiologia da produção. Seminário sobre fisiologia da produção e manejo de água e nutrientes na cultura do milho de alta produtividade**. Potafos: Piracicaba, 1996. 30p.
- FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. 3ª Ed. Maceió. EDUFAL. 2000, 422p.
- FRIZZONE, J.A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. 1986. 133p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- FRIZZONE, J.A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1993. 42p.: v. (LER. Série didática, 6).
- FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em cultura de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, v.5, n.1, p.34-53, 1994.

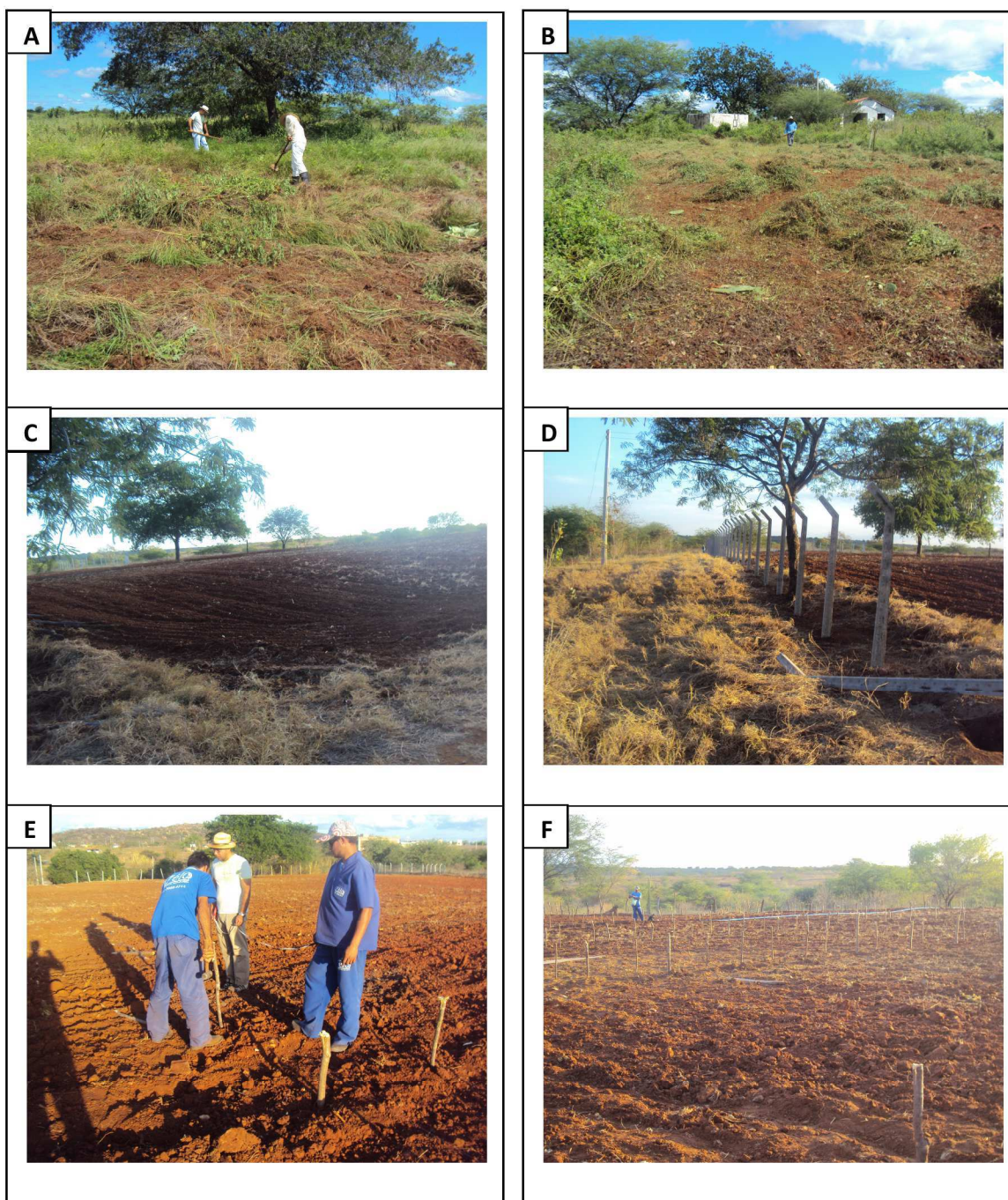
- FRIZZONE, J.A.; TEODORO, R.E.F.; PEREIRA, A.S.; BOTREL, T.A. Lâminas de água e doses de nitrogênio na produção de forragem de aveia (*Avena sativa* L.). **Scientia Agricola**, v.52, n.3; p.578-586, 1995.
- FRIZZONE, J. A.; COELHO, R. D.; DOURADO-NETO, D.; SOLIANI, R. Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senator Nilo Coelho project. *Scientia Agricola*, v. 54, n. especial, p. 136-148, junho 1997.
- FRIZZONE, J.A. **Função de produção**. In: Faria, M.A.; Silva, E.L.; Vilella, L.A.A.; Silva, A.M. (Ed.). Manejo da irrigação. Lavras: UFLA, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.86-116.
- FRIZZONE, J.A.; MATIOLI, C.S.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, *Saccharum* spp., para a região Norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v.23, n.5, p.1131-1137, 2001.
- FRIZZONE, J. A. Planejamento da Irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.24-49, 2007.
- GOMES, F. P. & CONAGIN, A. **Experimentos de adubação: planejamento e análise estatística**. Londrina – PR. Departamento de matemática aplicada – UEL, 1987. 97p.
- GRANT, R. F.; JACKSON, B. S.; KINIRY, J. R. ; ARKIN, G. F. Water deficit timing effects on yield components in maize. **Agronomy Journal**, v. 81, n. 1, p. 61-65. 1989.
- HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. Economics considerations of deficit irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.110, n.3, p.343-358, 1984.
- HARBECK Jr, G. E.; NORDENSON, T. J. ; OMAR, V. A. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1971. 122 p. (Nota técnica – 83).
- HEINEMANN, A.B.; HOOGENBOOM, G.A.; GEORGIEV, G.A.; FARIA, R.T.; FRIZZONE, J.A. Center pivot irrigation management optimization of dry beans in humid areas. **Transactions of the ASAE**, v.43, n.6, p.1507-15-16, 2000.
- HEINEMANN, A.B.; SOUSA, S.A.V; FRIZZONE, J.A. Determinação da lâmina ótima de água para a cultura do milho doce na região de Sete Lagoas, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n1, p.147-151, 2001.
- HERRERO, M.P. & JOHNSON, R.R. Drought Stress and its effects on maize reproductive systems. **Crop Science**, v.21, p.105-110, 1981.
- INMAN-BAMBER, N.G. & SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, p.185-202, 2005.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, setembro de 2009**. <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 14 de outubro de 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico, 2010**. <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 14 de junho de 2010.
- JARA, J.; STOCHLE, C. O.; KJELGAARD, J. Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea mays* L.) field. **Agricultural and Forest meteorology**, v. 92, p. 131-145, 1998.

- JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants In: KOZLOWSKI, T.T. (ed.). **Water deficits and plant growth**. New York, Academic Press, 1968, v.2, p.1-22.
- KARIMI, M. & GOMROKCHI, A. Yield and water use efficiency of corn planted in one or two rows and applying furrow or drip tape irrigation systems in Ghazvin province, Iran. **Irrigation and Drainage**, v.60, n.1, p.35-41, 2011.
- KINIRY, J. R. & RITCHIE, J. T. Shade-sensitive internal kernel number of maize. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 711-715. 1985.
- KRAMER, P. J. **Plant and soil water relationships: a modern synthesis**. New York: McGraw Hill. 482 p. 1969.
- LINK, J.; GRAEFF, S.; BATCHELOR, W.; CLAUPEIN, W. Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. **Agricultural Systems**, v.91, p.135-153, 2006.
- MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Circular técnica nº 22, Sete Lagoas- MG, Dezembro, 2002.
- MARTIN, D.; BROCKLIN, J. VAN.; WILMES, G. Operating rules for deficit irrigation management. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.4, p.1207-1215, 1989.
- MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-deaçúcar: modelo de decisão para o estado de São Paulo**. 1998, 122p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1998.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Relação entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 85-92, 1995.
- MEIRELLES, M. L.; FARIAS, S. E. M. de; GUERRA, A. F.; FRANCO, A. C. **Evapotranspiração em plantio de milho no cerrado**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento nº 84. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2003, 17 p.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. London: Kluwer Academic, 2001. 849p.
- MONTEIRO, M. A. R.; PEREIRA FILHO, I. A.; GAMA, E. E. G.; KARAM, D.; CRUZ, J. C. Avaliação Preliminar de Híbridos Triplos de Milho Visando Consumo Verde. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24, 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1CD-ROM. 2002.
- MORAES, A. R. A.; RAMOS JÚNIOR, E. U.; GALLO, P. B.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; SWASAKI, E. DUARTE, A. P.; BERNINI, C. S.; GUIMARÃES, P. S. Desempenho de oito cultivares de milho verde na safrinha, no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.9, n.1, p. 79-91, 2010.
- MORIZET, J. & TOGOLA, D. **Effect et arrière-effect de la sécheresse sur la croissance de plusieurs génotypes de maïs**. In: CONFÉRENCE INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE, 1984, Versailles. Les besoins en eau des cultures. Paris: INRA, 1984. p.351-360.
- MOSS, G. I. & DOWNEY, L. A. Influence of drought stress on female gametophyte development in corn (*Zea Mays* L.) and subsequent grain yield. **Crop Science**, v. 11, p. 368-372. 1971.

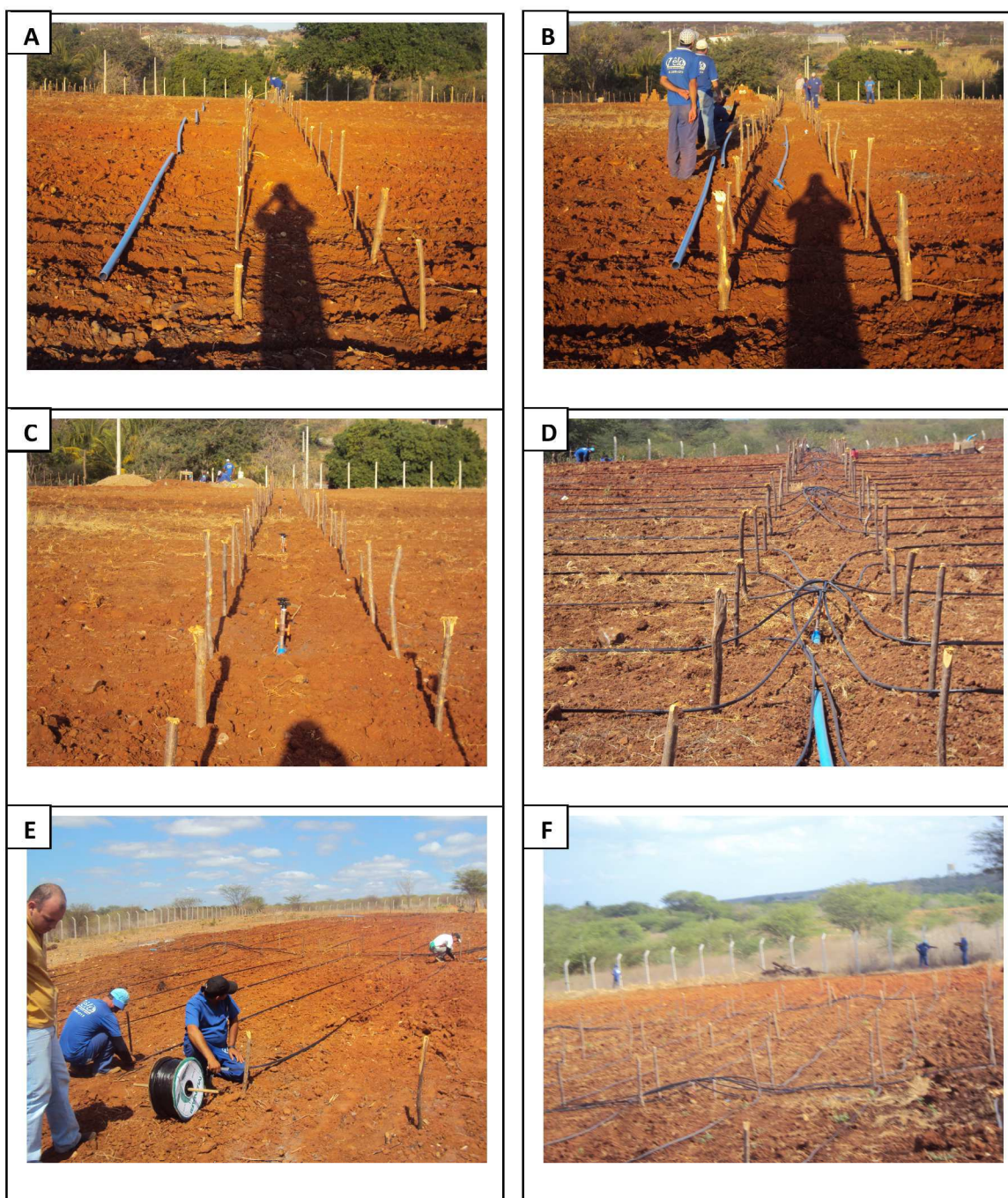
- MOURA, C.S. **Vulnerabilidade das terras agrícolas, degradação ambiental e riscos de desastres ENOS no município de Sumé, PB.** Campina Grande, UFPB, 2002. 155p. Dissertação de Mestrado.
- MUCHOW, R. C. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment. II. Effect of water deficits. **Field Crops Research**, v. 20, p. 207-219, 1989.
- OLIVEIRA JUNIOR, L. F. G.; DELIZA, R.; BRESSAN-SMITH, R.; PEREIRA, M. G.; CHIQUIERE, T. B. Seleção de genótipos de milho mais promissores para o consumo *in natura*. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 1, p. 159-165, 2006.
- PAIVA JÚNIOR, M. C. de; PINHO, R. G.von; PINHO, E. V. R.von; RESENDE, S. G. de. Desempenho de cultivares para a produção de milho verde em diferentes épocas e densidades de semeadura em Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 5, p. 1235-1247, 2001.
- PAVINATO, P. S.; CARETTA, C. A.; GIROTON, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.358-364, 2008.
- PAYERO, J.O.; TARKALSON, D.D.; IRMAK, S.; DAVISON, D. PETERSEN, J.L. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v.95, p.895-908, 2008.
- PAZ, V.P.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FOLEGATTI, M.V. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.404-408, 2002.
- PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. GAMA, E. E. G. **Cultivares para o consumo verde**. In: PEREIRA FILHO, I. A. (Ed.). O cultivo do milho verde. Brasília. DF: EMBRAPA informação tecnológica, 204 p. 2003.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. ; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ (Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queros), 1997. 1863p
- PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. **Colheita, transporte e comercialização**. In: PEREIRA FILHO, I. A. (Ed.). O cultivo do milho-verde. Brasília, DF: Embrapa Informacao Tecnologica, 2003. cap. 11, p. 183-194.
- PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C.; GAMA, E. E. G. Cultivares para o consumo verde. In: **O cultivo do milho verde**. Brasília: Embrapa Informação tecnológica, 2003. p. 17-30
- PHENE, C.J. Techniques for computerized irrigation management. **Computer and Eletronics in Agriculture**, v.3, n.3, p.189-208, 1989.
- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Nobel, 1985. 466 p.
- QUEIROZ, J.E.; CALHEIROS, C.B.M.; PESSOA, P.C.S.; FRIZZONE, J.A. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.1, p.55-61, 1996.

- RESTLE, J.; NEUMANN, M.; BRANDONI, I. L.; PASCOAL, L. L.; SILVA, J. H. S. da; PELLEGRINI, L. G. de; SOUZA, A. N. M. de. Manipulação da altura de corte da planta de milho (*Zea mays*, L.) para ensilagem visando a produção do novilho superprecoce. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.3, p.1235-1244, 2002.
- ROBINS, J. S. & DOMINGO, C. E. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. **Agronomy Journal**, v. 45, p. 618-621, 1953.
- RODRIGUES, F.; PINHO, R. G. V.; ALBUQUERQUE, B. C. J.; FARIA FILHO, E. M.; GOULART, J. C. Capacidade de combinação entre linhagens de milho visando à produção de milho verde. **Bragantia**, v.68, n.1, p.75-84, 2009.
- RODRIGUES, V. N.; PINHO, R. G. V. Produção de milho-verde. 32 p. Apostila pdf,1999. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:7qNfGWHGzbgJ:www>.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: USSS, 1954. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).
- RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, construction and use. *Agricultural Engineering*, v. 28, n. 10, p. 451-454, 1947.
- SALOMON, K.H. Typical crop water production functions. Chicago: **American Society of Agricultural Engineers**, 1985. p.17-20 (ASAE. Paper, 85-2296).
- SANTOS, I. C. dos; MIRANDA, G. V.; MELO, A. V. de; MATTOS, R. N.; OLIVEIRA, L. R.; LIMA, J. S.; GALVÃO, J. C. C. Comportamento de cultivares de milho produzidos organicamente e correlações entre características das espigas colhidas no estágio verde. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.1, p.45-53, 2005.
- SANTOS, D.C.; FARIAS, I.; LIRA, M.A. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia e Nopalea*) em Pernambuco**. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2006. 48p. (Documentos, 30).
- SCHUSSLER, R.J. & WESTGATE, M.E. Maize kernel set at low potential: II. Sensivity to reduced assimilates at pollination. **Crop Science**, v.31, p.1196-1203, 1991a.
- SCHUSSLER, R.J. & WESTGATE, M.E. Maize kernel set at low potential: II. Sensivity to reduced assimilates at pollination. **Crop Science**, v.31, p.1196-1203, 1991b.
- SILVA, D.D. DA; LOUREIRO, B.T.; BERNARDO, S.; GALVÃO, J.D. Efeitos de lâminas de água e doses de nitrogênio na cultura do milho irrigada por aspersão em linha. **Revista Ceres**, v.39, n.222, p.91-104, 1992.
- SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum spp.* Hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, n. 90, p. 95 – 100. 2007.
- STEGMAN, E.C., MUSICK, J.T.; STWART, J.I. Irrigation Water Management. In: JESEN, M.E.; ed **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1980. 829p.
- STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O. Functions to predict optimal irrigation programs. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.100, n.2, p.179-197, 1974.

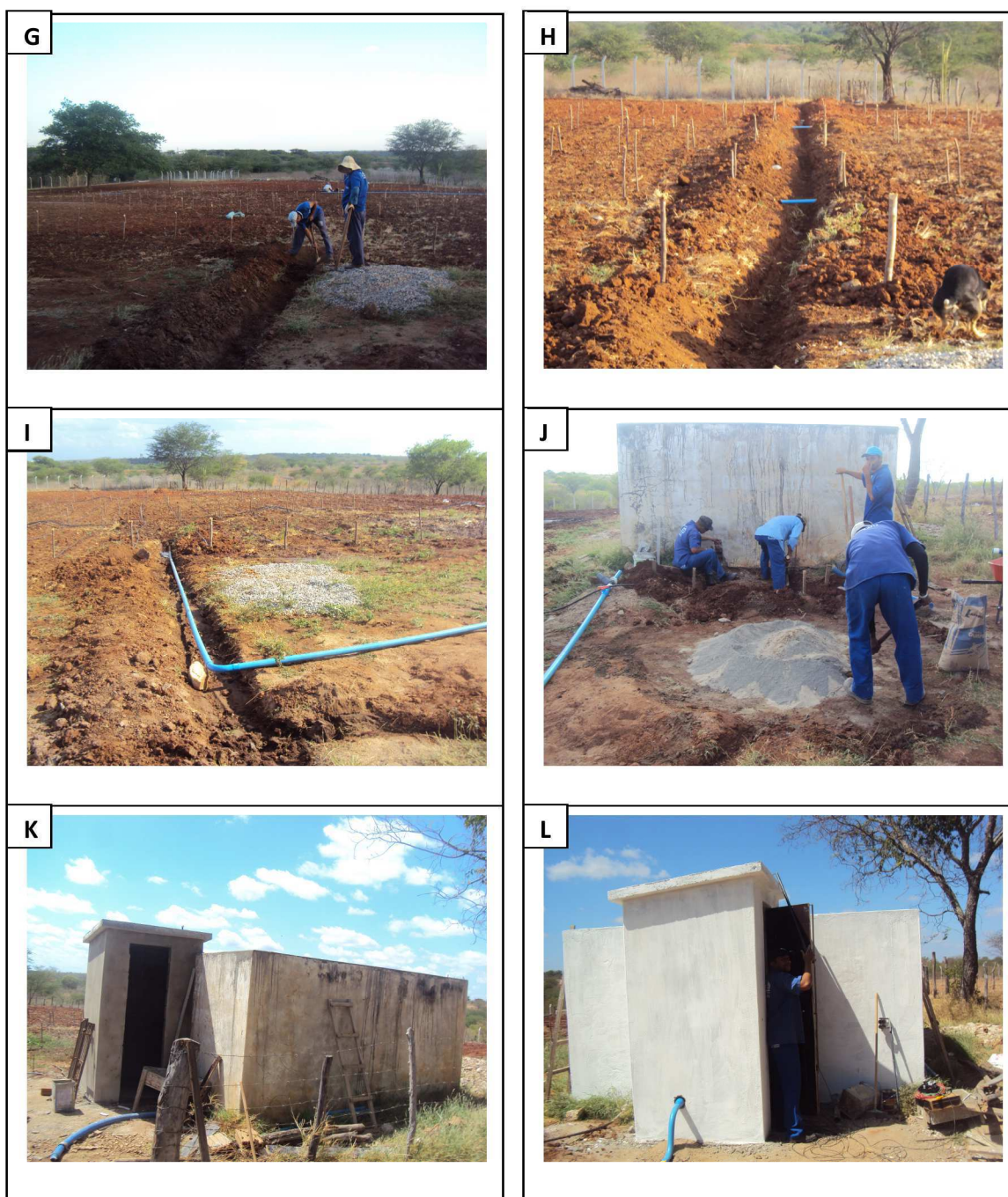
- TABOSA, J. N.; OLIVEIRA, J. P.; REIS, A. R. M. B.; AZEVEDO NETO, A. D.; MONTEIRO, M. C. D.; FERREIRA, P. F. Avaliação preliminar de cultivares para produção de milho verde na Zona da Mata Norte de Pernambuco. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., 2000. Uberlândia. MG. A inovação tecnológica e a competitividade no contexto dos mercados globalizados. **Resumos Expandidos...** Sete Lagos: ABMS/Embrapa Milho e Sorgo/ Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 1CD-ROM.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TEODORO, I. **Avaliação da evapotranspiração e desenvolvimento da cultura do milho irrigado na região de Rio Largo-Al**. Maceió: UFAL, 2003. 127p. Dissertação de mestrado.
- TETIO-KAGHO, F. & GARDNER, F. P. Responses of maize to plant population density. II. Reproductive development, yield, and yield adjustments. **Agronomy Journal**, v. 80, n. 6, p. 935-940, 1988.
- VASCONCELOS, A. G. V.; LIRA, M. de A.; CAVALCANTI, V. L. B.; SANTOS, M. V. F. dos; WILLADINO, L. Seleção de clones de palma forrageira resistentes à cohonilha-do-carmim (*Dactylopius* SP). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.5, p.827-831, 2009.
- VIEIRA, M. A. **Cultivares e população de plantas na produção de milho-verde**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- VIEIRA, M. A.; CMARGO, M. K.; DAROS, E.; ZAGONEL, J.; KOEHLER, H. S. Cultivares de milho e população de plantas que afetam a produtividade de espigas verdes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 81-86, 2010.
- VIGLIO, E. C. B. L. Produtos orgânicos: uma tendência para o futuro? **Agroanalysis**, v. 16, n. 12, p. 8-11, dez. 1996.
- VISWANATHA, G. B., RAMACHANDRAPP, B. K.; NANJAPPA, H.V. Soil-plant water status and yield of sweet corn (*Zea mays* L. cv. Saccharata) as influenced by drip irrigation and planting methods. **Agricultural Water Management**, v.55, n.2, p.85-91, 2002.
- WARUMBY, J.F.; ARRUDA FILHO, G.P.; CAVALCANTI, V.A.L.B. Pragas da palma. In: MENEZES, R.S.C; SIMÕES, D.A.; SAMPAIO, E.V.S.B (Eds.). **A palma no Nordeste do Brasil**. 1.ed. Recife: UFPE; Editora Universitária, 2005. p.65-80.
- WIEDENFELD, B. & ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 655-671, 2008.
- YAZAR, A.; GOKCEL, F.; SEZEN, M. S. Corn yield response to partial rootzone drying and deficit irrigation strategies applied with drip system. **Plant Soil Environment**, v.55, n.11, p.494-503, 2009.
- ZINSELMEIER, C.; WESTGATE, M. E. ; JONES, R. J. Kernel set at low water potential does not vary with source/sink ratio in maize. **Crop Science**, v.35, p.158-163, 1995.

Apêndice 1. Preparação da área experimental

Fotos A 1. Início da capina manual da área experimental (A) e (B); Solo submetido a aração mecanizada após o processo de capina e limpeza da área (C); Execução de cerca com 13 arames e estacas de concreto armado com pontas viradas, para proteção da área experimental (D); Demarcação com piquetes de madeira das parcelas e subparcelas experimentais (E) e (F)

Apêndice 2. Preparação do sistema de irrigação na área experimental

Fotos A 2. Instalação dos tubos de irrigação que compõem as linhas secundárias de irrigação (A) e (B); Colocação dos registros e das conexões de derivação para ligações das mangueiras gotejadoras (C) e (D); Fixação das mangueiras gotejadoras compondo as parcelas experimentais (E) e (F)

Apêndice 2. Preparação do sistema de irrigação na área experimental

Fotos A 2.1. Escavação de valas para colocação da tubulação principal de irrigação (G) e (H); Tubulação principal de irrigação interligada às tubulações laterais de irrigação (I); Construção da casa de bomba ao lado da cisterna de abastecimento de água para irrigação (J), (K) e (L)

Apêndice 3. Preparação do lisímetro na área experimental



Fotos A 3. Escavação do lisímetro com separação das camadas do solo para posterior preenchimento do mesmo (A) e (B); Execução do tanque em alvenaria que irá compor o lisímetro (C); Escavação do poço de coleta da água de drenagem e da vala do dreno do lisímetro(D); Impermeabilização cerâmica das paredes e fundo do lisímetro (E) e (F).

Apêndice 3. Preparação do lisímetro na área experimental



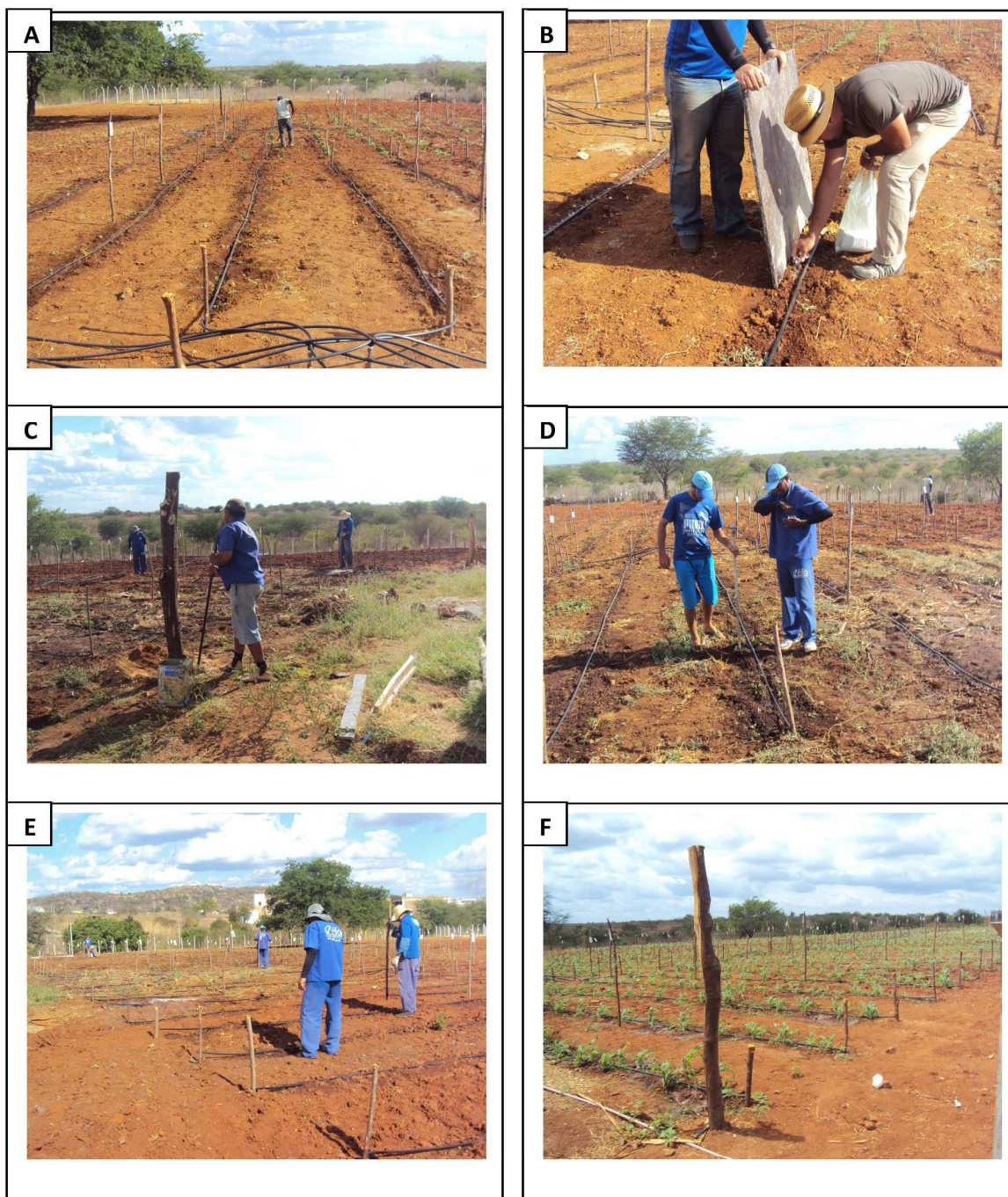
Fotos A 3.1. Construção do poço de coleta da drenagem em alvenaria (G), (H) e (I); Acabamentos finais do sistema do lisímetro e poço de drenagem (J); Execução do abrigo do sistema de abastecimento da irrigação do lisímetro (K) e (L)

Apêndice 3. Preparação do lisímetro na área experimental

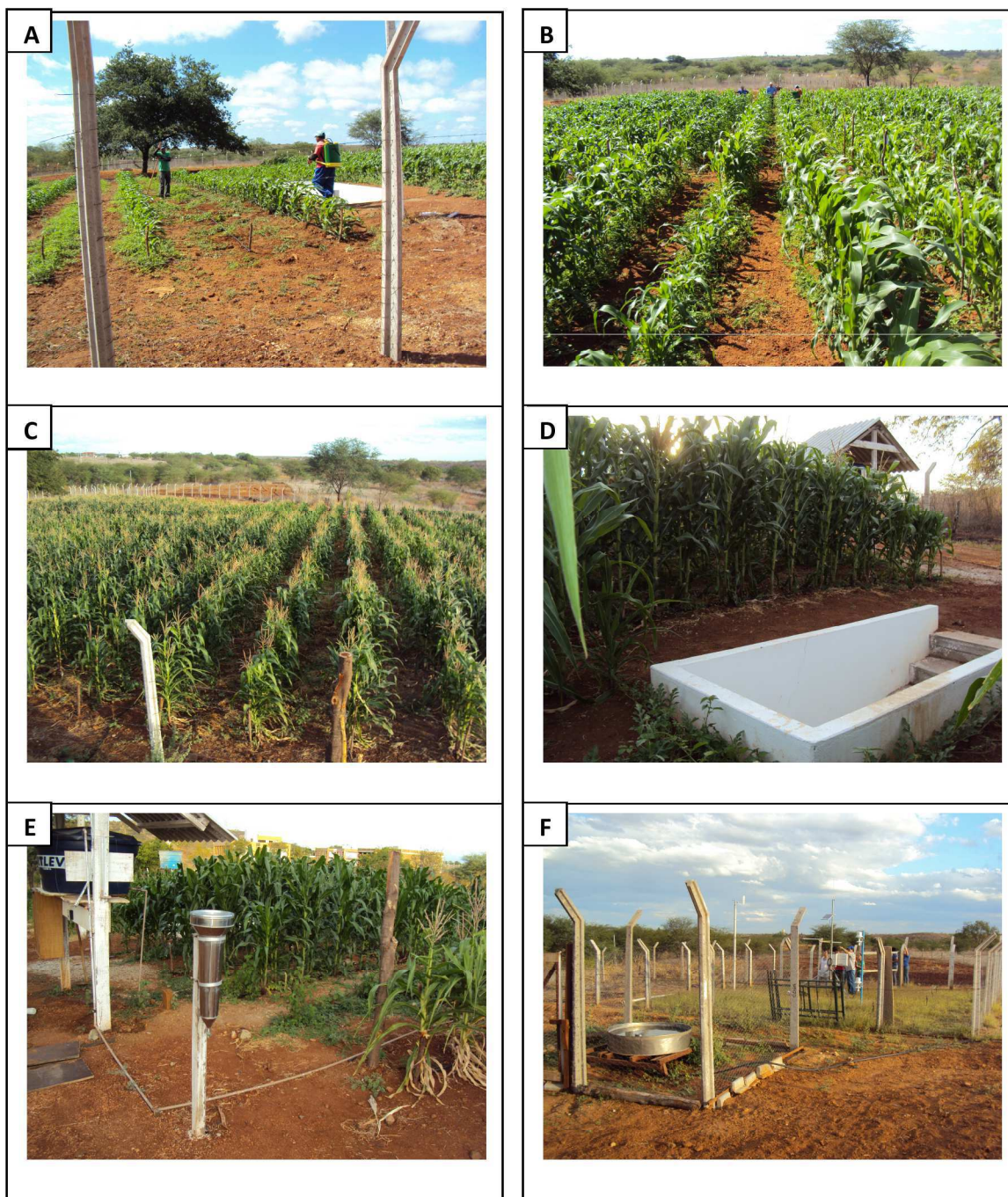
Fotos A 3.2. Vista do abrigo do sistema de abastecimento de água para irrigação do lisímetro (M); Colocação de brita no fundo do lisímetro (N); Instalação do tubo principal para abastecimento de água para o lisímetro (O), (P), (Q) e (R)

Apêndice 3. Preparação do lisímetro na área experimental

Fotos A 3.3. Instalação de tubos laterais investido como camada de brita para homogeneização da irrigação subsuperficial do lisímetro (S), (T), (U) e (V); Boia colocada no tubo principal para controle do nível de lençol freático no lisímetro (X); Vista do lisímetro depois da colocação do solo e do sistema de irrigação subsuperficial (Z)

Apêndice 4. Adubação do solo e plantio do milho

Fotos A 4. Irrigação e limpeza prévia para os procedimentos de adubação (A); Adubação na linha de plantio conforme quantitativo previsto para cada subparcela do delineamento estatístico (B); Plantio manual do milho (C), (D) e (E); Emergência das plantas de milho na área experimental (F)

Apêndice 5. Tratos culturais

Fotos A5. Pulverização para controle de pragas na cultura (A) e (B); Pendoamento do milho (C); Vista da plantação no lisímetro (D); Pluviômetro para medição da precipitação próximo do lisímetro (E); Tanque classe A, para medição da evaporação local (F).

Apêndice 6. Colheita do milho verde para análise

Fotos A6. Milharal no ponto de colheita (A); Colheita manual do milho verde nas subparcelas experimentais (B); Condução das espigas de milho para laboratório de análises (C); Espigas de milho verde de cada subparcela experimental prontos para análises (D); Laboratório de análises e balança de pesagem da matéria verde de cada subparcela experimental (E); Matéria verde de cada subparcela experimental, após pesagem (F)