



DOUGLAS JOSÉ MARQUES

**PROPORÇÕES DE SILICATO E CARBONATO
DE CÁLCIO NO CRESCIMENTO, NUTRIÇÃO
MINERAL E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA
POR PLANTAS DE MILHO SOB ESTRESSE
HÍDRICO**

LAVRAS – MG

2013

DOUGLAS JOSÉ MARQUES

**PROPORÇÕES DE SILICATO E CARBONATO DE CÁLCIO NO
CRESCIMENTO, NUTRIÇÃO MINERAL E EFICIÊNCIA DO USO DA
ÁGUA POR PLANTAS DE MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientadora

Dra. Janice Guedes de Carvalho

Coorientadores

Dr. Mozart Martins Ferreira

Dr. Ernani Clarete da Silva

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Marques, Douglas José.

Proporções de silicato e carbonato de cálcio no crescimento,
nutrição mineral e eficiência do uso da água por plantas de milho
sob estresse hídrico / Douglas José Marques. – Lavras : UFLA,
2013.

184 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Janice Guedes de Carvalho.

Bibliografia.

1. *Zea mays*. 2. Silício. 3. Deficiência hídrica. 4. Nutrientes. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.821

DOUGLAS JOSÉ MARQUES

**PROPORÇÕES DE SILICATO E CARBONATO DE CÁLCIO NO
CRESCIMENTO, NUTRIÇÃO MINERAL E EFICIÊNCIA DO USO DA
ÁGUA POR PLANTAS DE MILHO SOB ESTRESSE HÍDRICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 22 de maio de 2013.

Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto	UFLA
Dr. Fernando Broetto	IBB/UNESP
Dr. Jacinto de Assunção Carvalho	UFLA
Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães	EPAMIG

Dra. Janice Guedes de Carvalho
Orientadora

**LAVRAS - MG
2013**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por encaminhar pessoas que acrescentaram em minha formação e pela oportunidade de realizar mais esta etapa de minha vida em especial pela intercessão de Santa Terezinha do Menino Jesus, São Jorge e São Bento.

“Pedi que Deus me mostrasse a alegria ele me apresentou a agronomia e direcionou para a pesquisa e extensão agrícola, dizendo trabalhe pela terra e verá novos horizontes”.

Aos meus pais, Geraldo e Luiza, pela educação, carinho e dedicação, aos meus queridos irmãos Cíntia, Fabiane e Kleber.

A minha namorada Samantha que sempre esteve comigo em todos os momentos, aconselhando-me com palavras de amor, alegria e seu sorriso cativante.

A minha segunda família, os Madureira, aos queridos João Aquino, Nilda e Marinilda que sempre me receberam com tanto amor e carinho.

In memória de minhas avós Tereza Hortência e Elisa.

Ao meu tio Rosário.

A todos que me incentivaram e apoiaram durante a execução deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador da graduação e co-orientador no doutorado:

Prof. Dr. Ernani Clarete da Silva que, com seus ensinamentos, orientação e competência metódica me cativou e ajudou na formação do cidadão, profissional, no qual me espelho com valores únicos de amizade.

Ao meu orientador no mestrado:

Prof. Dr. Fernando Broetto, que me recebeu, direcionou, confiou em meu trabalho e transmitiu todo o seu conhecimento durante o mestrado e, atualmente, tenho seguido esta linha de pesquisa que é o estresse de plantas. Sempre muito dedicado, muito atencioso, detalhista e competente na execução do trabalho, em especial pelos conselhos, amizade e acrescentado na formação do profissional e cidadão.

Aos orientadores no doutorado:

Professora Dra. Janice Guedes de Carvalho que me recebeu e me deu apoio, muito atenciosa e prestativa com alegria única. Por me deixar à vontade nos temas para desenvolver a tese.

Ao Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira que me recebeu em função do problema de saúde da orientadora. Fiquei muito feliz com sua contribuição e me ajudou na conclusão do trabalho sempre com palavras de motivação, de confiança e amizade em momentos difíceis durante o treinamento de doutoramento. Professor muito metódico, muito acrescentou em minha formação técnica, pessoal e humana.

A CAPES pela bolsa concedida, proporcionou-me a realização deste projeto. E ao CNPq pelos recursos fomentados para a execução do projeto.

Aos professores da UFLA:

Dr. Carlos Alberto Silva

Dr. Evaristo Mauro de Castro

Dr. Fabricio José Pereira

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

Dr. Moacir de Souza Dias Júnior

pelos conselhos e orientação.

Aos funcionários:

Pezão, Adalberto, Dirce e Roberto do Dept° de Ciência do Solo
José Luiz, do Dept° de Engenharia.

pela colaboração e gentileza.

Aos colegas:

A todos os colegas que conheci, durante minha caminhada no doutorado, em especial aos colegas de pós-graduação, funcionários, colegas da cidade de Lavras-MG.

A Dra. Ana Rosa Bastos Rigitano que demonstrou muita atenção, prestativa e sempre disposta a ajudar.

Ao amigo Prof. Dr. Allan Klynger da Silva Lobato pela parceria, colaboração e aprendizado sempre muito metódico e honesto.

Ao acadêmico de doutorado Wellington Freitas e ao Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho pela ajuda incondicional.

Ao doutorando Fabricio William Ávila pela amizade e contribuição sempre muito honesto e metódico.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Corrêia Landgraf pela amizade e oportunidade.

pela oportunidade de levar um pouco deles e deixar um pouco de mim.

RESUMO

A população mundial vem aumentando, principalmente, nos países mais pobres e vulneráveis do terceiro mundo, onde a produção de alimentos não tem acompanhado essa tendência, grande parte por apresentarem áreas marginais para a agricultura, com deficiências de água e de nutrientes. O silício, por apresentar várias funções específicas dentro da planta, surge como uma alternativa para amenizar estresses bióticos e abióticos. Sendo assim, objetivou-se com o trabalho investigar a ação do silício sobre diferentes parâmetros de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho expostas à deficiência hídrica. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Setor de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Engenharia-UFLA. O experimento foi implantado em vasos de 15 dm³, preenchidos com material de um Latossolo Vermelho de classe textural argilosa. Utilizou-se a cultivar de milho BR 106. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial (5x5), com quatro repetições. Os tratamentos foram assim constituídos: cinco associações de corretivos (0% silicato de cálcio e 100% de carbonato de cálcio; 25% de silicato de cálcio e 75% de carbonato de cálcio; 50% de silicato de cálcio e 50% de carbonato de cálcio; 75% de silicato de cálcio e 25% carbonato de cálcio; 100% de silicato de cálcio e 0% carbonato de cálcio) e cinco lâminas de irrigação (30, 70, 100, 130, 160% da lâmina recomendada. Nos resultados das diferentes avaliações, revelou-se que os efeitos dos tratamentos, sobre as plantas de milho, ficaram evidentes apenas nas menores aplicações de água. A absorção e acumulação de Ca, nas diversas partes da planta de milho, decresceram com o aumento da proporção de silicato de cálcio no corretivo. Não foram observadas tendências claras da participação do silício nas concentrações de macro e micronutrientes nas diversas partes da planta de milho. O silício promoveu alterações na atividade fisiológica e na anatomia das folhas do milho nas diferentes lâminas de irrigação. Confirmando a premissa do trabalho, verificou-se que, nas menores lâminas de irrigação, a produção das plantas de milho acompanhou o aumento do silicato de cálcio no corretivo até a proporção de 50%.

Palavras-chave: *Zea mays*. Silício. Deficiência hídrica. Nutrientes.

ABSTRACT

The world population is increasing, especially in the poorest and most vulnerable countries on third world where food production has not increased as this trend, mainly by presenting areas marginal for agriculture, with deficiencies of water and nutrients. The silicon present several specific functions on the plant emerges as an alternative to alleviate biotic and abiotic stresses. The objective was investigated the action of working silicon on different parameters of growth and development of maize plants exposed to water stress. The experiment was conducted in a greenhouse at the Division of Soil and Water Engineering, Department of Engineering-UFLA, Brazil. The experiment was conducted in pots of 15 dm³, filled with material of a Red clay textural class. Cultivar BR 106 was used and was adopted a randomized block design in a factorial design (5x5) with 4 replications. The treatments were formed as follows: five associations of lime (calcium silicate 0% and 100% calcium carbonate, 25% calcium silicate and 75% calcium carbonate, 50% calcium silicate and 50% carbonate calcium and 75% calcium silicate and 25% calcium carbonate; 100% calcium silicate and 0% calcium carbonate) and five irrigation (30, 70, 100, 130, blade 160% recommended). Results of the various evaluations revealed that the effects of treatments on corn plants were evident only in minor water applications. Absorption and accumulation of Ca in different parts of the maize plant decreased with the increase of the proportion of calcium silicate in the lime. Not clear trends were observed for the participation of silicon concentrations of macro and micronutrients in different parts of the maize plant. Silicon promoted changes in physiological activity and anatomy of leaves of maize in different irrigation. Confirming the premise of the work it was found that in the lower irrigation production of corn plants follow the increase of calcium silicate in the lime to the proportion of 50%.

Keywords: *Zea mays*. Silicon. Water deficiency. Nutrients.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1	Curva característica de retenção de água do Latossolo Vermelho utilizado no experimento.....	33
Figura 1	Sistema de irrigação montado para o manejo da irrigação condução do experimento	36
Gráfico 2	Temperatura máxima, mínima e média dentro da casa de vegetação durante o período experimental.....	46
Gráfico 3	Temperatura do solo (°C) nas diferentes lâminas de irrigação, em cada proporção de silicato de cálcio, ao longo do período experimental.....	48
Gráfico 4	Comparação da Temperatura média do solo (°C) nas diferentes proporções de silicato de cálcio em cada lâmina de irrigação.....	49
Gráfico 5	Variação do potencial matricial da água do solo ao longo do período experimental	51
Gráfico 6	Variação do potencial matricial antes e depois da irrigação (A) tensiômetro e (B) watermark.....	52
Gráfico 7	Volume médio de água (Litro/planta ⁻¹) aplicado nos tratamentos durante o período experimental	53
Gráfico 8	Condutividade elétrica do solo em função das proporções de silicato de cálcio em cada lâmina de irrigação	55
Gráfico 9	Condutividade elétrica do solo em função das diferentes lâminas de irrigação, em cada proporção de silicato de cálcio.....	57
Gráfico 10	Massa da matéria seca da raiz (g) em função das lâminas de irrigação dentro de cada proporção de silicato de cálcio	66
Gráfico 11	Massa da matéria seca da raiz (g) em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação aplicada.....	68
Gráfico 12	Massa de matéria seca do colmo (g) em função das diferentes lâminas de irrigação, dentro de cada proporção de silicato de cálcio.....	70
Gráfico 13	Massa de matéria seca do colmo (g) em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação	72
Gráfico 14	Massa da matéria seca das folhas (g) em função das proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação	74
Gráfico 15	Massa da matéria seca das folhas (g) em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio	76
Gráfico 16	Massa de matéria seca do sabugo (g) em função das lâminas de irrigação dentro de cada proporção de silicato de cálcio	78

Gráfico 17	Massa de matéria seca do sabugo (g) em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação.....	80
Gráfico 18	Número de fileiras de grão na espiga em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação.....	83
Gráfico 19	Número de fileiras de grãos na espiga em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio	84
Gráfico 20	Número de colunas de grãos na espiga em função da proporção de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação.....	86
Gráfico 21	Número de colunas de grãos na espiga em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio.....	88
Gráfico 22	Comprimento da espiga (cm) em função das diferentes lâminas de irrigação, nas diversas proporções de silicato de cálcio	90
Gráfico 23	Comprimento da espiga (cm) em relação às diferentes proporções de silicato de cálcio em relação às diversas % da lâmina de irrigação	92
Gráfico 24	Produção de 100 grãos de milho (g) em função da proporção de silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação.....	94
Gráfico 25	Produção de grãos de milho (gramas planta ⁻¹) em função de proporções de silicato de cálcio em diferentes lâminas de irrigação	97
Gráfico 26	Concentrações de macronutrientes no colmo do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação	99
Gráfico 27	Concentrações de micronutrientes no colmo do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação	101
Gráfico 28	Concentrações de macronutrientes na folha do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação	103
Gráfico 29	Concentrações de micronutrientes na folha do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação	105
Gráfico 30	Concentrações de macronutrientes na palha da espiga do milho em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação	107
Gráfico 31	Concentrações de micronutrientes na palha da espiga do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação	109
Gráfico 32	Concentrações de macronutrientes no sabugo da espiga do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação.....	111

Gráfico 33	Concentrações de micronutrientes no sabugo da espiga do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação.....	113
Gráfico 34	Concentração de macronutrientes no grão do milho em relação às diferentes lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio.....	115
Gráfico 35	Concentração de micronutrientes no grão do milho em relação às diferentes lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio.....	117
Gráfico 36	Concentração de silício no colmo, folha, palha da espiga, sabugo da espiga e no grão do milho em relação às diferentes lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio.....	120
Gráfico 37	Porcentagem de silício em amostras de folha de milho em função de diferentes proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação.....	123
Gráfico 38	Porcentagem de silício em amostras de folha de milho em relação às diferentes % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação.....	124
Gráfico 39	Porcentagem de cálcio em amostras de folha de milho em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação.....	126
Gráfico 40	Porcentagem de cálcio em amostras de folha de milho em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação.....	127
Gráfico 41	Potencial hídrico do xilema quantificado às 6 horas (Gráfico A e B) e 14 horas (Gráfico C e D) aos 30 dias após o plantio em função das lâminas de irrigação e diferentes proporções de silicato de cálcio.....	129
Gráfico 42	Potencial hídrico do xilema quantificado às 6 horas (Gráfico A e B) e 14 horas (Gráfico C e D) aos 75 dias após o plantio em função das lâminas de irrigação e diferentes proporções de silicato de cálcio.....	132
Gráfico 44	Taxa fotossintética nas folhas de milho em função das diferentes proporções de silicato de cálcio dentro de cada lamina de irrigação quantificado aos 30 dias após o plantio.....	135
Gráfico 44	Taxa fotossintética nas folhas de milho em função das lâminas de irrigação dentro de diferentes proporções de silicato de cálcio, quantificado aos 30 dias após o plantio.....	136
Gráfico 45	Taxa fotossintética nas folhas de milho em função de diferentes proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação, quantificado aos 75 dias após o plantio.....	137

Gráfico 46	Taxa fotossintética nas folhas de milho em função das diferentes lâminas de irrigação em cada proporção de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio	138
Gráfico 47	Transpiração em folhas de milho em função de diferentes proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação quantificado aos 30 dias após o plantio	141
Gráfico 48	Transpiração em folhas de milho em função das diferentes lâminas de irrigação em todas as proporções de silicato de cálcio quantificado aos 30 dias após o plantio	142
Gráfico 49	Transpiração em folhas de milho em função das proporções de silicato de cálcio dentro de cada lâmina de irrigação quantificado aos 75 dias após o plantio	145
Gráfico 50	Transpiração em folhas de milho em função das diferentes lâminas de irrigação dentro de proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio	146
Gráfico 51	Cortes paradérmicos da seção abaxial na folha de milho número de estômatos (A), número de células da epiderme (B), densidade estomática (C), índice estomático em função das diferentes lâminas de irrigação dentro das proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio.....	151
Gráfico 52	Cortes paradérmicos da seção adaxial na folha de milho número de estômatos (A), número de células da epiderme (B), densidade estomática (C), índice estomático em função das diferentes lâminas de irrigação nas proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio	153
Gráfico 53	Corte transversal da seção na folha de milho espessura da epiderme da face abaxial (A), espessura da epiderme da face adaxial (B), espessura do mesofilo (C), distância entre feixes (D) em função das diferentes lâminas de irrigação dentro das proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio	155
Gráfico 54	Corte transversal da seção da folha de milho diâmetro equatorial de células buliformes da epiderme (E), diâmetro polar de células buliformes da epiderme (F), fibras (G) em função das diferentes lâminas de irrigação dentro das proporções de silicato de cálcio quantificada aos 75 dias após o plantio.....	156
Gráfico 55	Eficiência do uso da água aos 30 (A e B) e 70 (C e D) dias após o plantio em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação	159
Gráfico 56	Eficiência do uso da água para produção de grãos (A e B) e massa de matéria seca (C e D) em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação.....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Proporções e quantidades de silicato de cálcio e calcário aplicados em vaso de 15 dm ³	29
Tabela 2	Análise química e física do solo antes da adubação realizada no departamento de ciência do solo, DCS/UFLA, lavras, mg, 2013	30
Tabela 3	Nutrientes, concentrações requeridas, fonte das mesmas, utilizadas para a adubação básica do solo	31
Tabela 4	Análise química após a incubação do solo e adubação de base	32
Tabela 5	Altura das plantas das plantas de milho (m) aos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o plantio, em função das proporções de silicato de cálcio e lâminas de irrigação.....	59
Tabela 6	Diâmetro do colmo das plantas de milho (mm) no início e final do experimento, em função das proporções de silicato e lâminas de irrigação	61
Tabela 7	Número de folhas por planta de milho aos 15, 30, 45 e 60 dias após o plantio, em função das proporções de silicato de cálcio e lâminas de irrigação	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Importância econômica da cultura do milho	18
2.2	Deficiência hídrica na cultura do milho	19
2.3	Silício como elemento benéfico ao estresse hídrico	22
2.4	Respostas fisiológicas do milho sobre deficiência hídrica	23
2.5	Respostas anatômicas do milho a deficiência hídrica	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	Localização e instalação do experimento	28
3.2	Cultivar de milho	28
3.3	Delineamento experimental	28
3.4	Caracterização física e química do solo	29
3.5	Adubação de base	31
3.6	Caracterização hídrica do solo	33
3.7	Manejo da irrigação	34
3.8	Temperatura do solo	37
3.9	Condutividade elétrica da solução do solo	37
3.10	Avaliações biométricas das plantas	38
3.10.1	Altura das plantas	38
3.10.2	Diâmetro do colmo das plantas	38
3.10.3	Número de folhas por planta	39
3.10.4	Matéria seca da raiz, caule, folhas, sabugo e grãos	39
3.10.5	Componentes da produção das plantas	39
3.11.	Avaliação nutricional das plantas	39
3.12	Microscopia eletrônica de varredura/espectroscopia de raios x de energia dispersiva nas folhas de milho	40
3.13	Eficiência no Uso da Água (EUA)	41
3.13.1	Quantificação do EUA Fisiológico (EUA_F)	41
3.13.2	Quantificação da eua agronomicamente	41
3.14	Avaliações fisiológicas das plantas	42
3.14.1	Fotossíntese e taxa de transpiração	42
3.14.2	Potencial hídrico foliar	43
3.15	Características anatômicas das folhas	43
3.16	Análises estatísticas dos dados	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Monitoramento ambiental no interior da casa de vegetação	45
4.2	Temperatura do solo	46
4.3	Manejo da irrigação	49
4.4	Condutividade elétrica do solo	54

4.5	Avaliações biométricas das plantas	58
4.5.1	Altura das plantas.....	58
4.5.2	Diâmetro do colmo das plantas de milho	60
4.5.3	Número de folhas por planta	62
4.5.4	Massa de matéria seca da raiz	64
4.5.5	Massa de matéria seca do colmo.....	69
4.5.6	Massa de matéria seca das folhas	73
4.5.7	Massa de matéria seca do sabugo.....	77
4.6	Componentes da produção	81
4.6.1	Número de fileira de grãos na espiga	81
4.6.2	Número de colunas de grãos na espiga.....	85
4.6.3	Comprimento da espiga.....	89
4.6.4	Massa de 100 grãos de milho	93
4.6.5	Produção de grãos.....	95
4.7	Avaliação nutricional das plantas	97
4.7.1	Concentrações de macro e micronutrientes no colmo	97
4.7.2	Concentrações de macro e micronutriente na folha	102
4.7.3	Concentração de macro e micronutriente palha na espiga.....	106
4.7.4	Concentrações de macro e micronutriente no sabugo da espiga.....	110
4.7.5	Concentrações de macro e micronutriente no grão do milho	114
4.7.6	Concentrações de silício nas diferentes partes da planta de milho.....	118
4.8	Microscopia eletrônica de varredura/espectroscopia de raios x de energia dispersiva.....	121
4.8.1	Porcentagem de silício na folha de milho	121
4.8.2	Porcentagem de cálcio na folha de milho	124
4.9	Avaliações fisiológicas das plantas	127
4.9.1	Potencial hídrico do xilema na folha de milho	127
4.9.2	Taxa fotossintética na folha de milho	132
4.9.3	Transpiração nas folhas de milho.....	139
4.10	Anatomia vegetal da folha do milho.....	147
4.10.1	Secções paradérmicas da seção abaxial.....	147
4.10.2	Secções paradérmicos da seção adaxial na folha de milho	151
4.10.3	Secções transversais da seção abaxial na folha de milho	154
4.11	Eficiência no Uso da Água (EUA)	157
4.11.1	Eficiência no uso da água fisiológico	157
4.11.2	Eficiência do uso da água agrônômico	159
5	CONCLUSÕES.....	162
	REFERÊNCIAS.....	163

1 INTRODUÇÃO

A população mundial vem aumentando, principalmente, nos países mais pobres e vulneráveis do terceiro mundo, onde a produção de alimentos não tem acompanhado essa tendência, grande parte por apresentarem áreas marginais para a agricultura, com deficiências de água e de nutrientes.

Previsões dão conta de que, nas próximas décadas, as mudanças de clima poderão ser tão intensas, a ponto de mudar a geografia da produção agrícola mundial. Existem evidências de que deverão ocorrer aumentos de temperatura e que esses, por menores que sejam, trarão consequências dramáticas na distribuição das culturas no mundo. Estima-se que o aumento das temperaturas, em decorrência do aquecimento global, pode provocar perdas nas safras de grãos, gerando déficit orçamentário da ordem de R\$ 7,4 bilhões já em 2020, valor esse que pode subir para R\$ 14 bilhões em 2070 (ASSAD; PINTO, 2008).

De modo geral, as plantas em condições de campo estão constantemente expostas a estresses abióticos ou bióticos e podem sofrer interações negativas, que podem afetar, significativamente, o rendimento da cultura. Os principais fatores abióticos limitantes da produtividade em diversas espécies são deficiência hídrica, alagamento, baixas e altas temperaturas, salinidade. Entretanto, a deficiência hídrica é considerada a principal causa da redução de produtividade agrícola mundial.

No Brasil estima-se que cerca de 20% da área plantada com milho, equivalendo a, aproximadamente, 8,5 milhões de hectares, é afetada pela seca, resultando em uma perda na produção deste cereal de mais de 23,7 milhões de toneladas e em anos e locais específicos, pode-se chegar à perda total da produção (DURÃES et al., 2004).

Como uma das alternativas de amenizar os efeitos de estresses abióticos e bióticos, o silício apresenta várias funções específicas, sendo considerado um elemento benéfico na nutrição das plantas. Esse efeito benéfico é atribuído à alta acumulação de sílica nos tecidos da planta.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de investigar a ação do silício sobre parâmetros morfológicos, nutricionais, bioquímicos, fisiológicos, anatômicos e da produção de plantas de milho expostas à deficiência hídrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância econômica da cultura do milho

O Brasil destaca-se como o terceiro produtor mundial de milho, perdendo apenas em produção para os Estados Unidos e a China (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2007). Trata-se de uma cultura que apresenta grande importância social e econômica, mundialmente e, principalmente, no Brasil, caracterizando-se como uma cultura altamente diversificada, desde agricultura tipicamente de subsistência até lavouras de alto nível tecnológico. Embora o Brasil seja o terceiro maior produtor mundial de grãos, muitos estudos têm sido desenvolvidos visando a uma adaptação melhor das culturas a regiões com limitações hídricas e mais tolerantes à acidez (CANTARELLA, 1993; RAIJ et al., 1998). O rendimento das espécies, sob estresse, está bem aquém dos seus potenciais de produtividade, dentre as quais se encontra o milho, caracteristicamente pouco tolerante ao déficit hídrico (SILVA; NOVAIS; SEDIYAMA, 1984) e cujo cultivo em regiões semi-áridas, como o Nordeste brasileiro, é de suma importância não só para suprir diretamente as necessidades alimentares da população, mas, também da agroindústria regional.

Para 2012, a produção de milho estimada foi da ordem de 165,9 milhões de toneladas. Em relação à safra anterior, o crescimento estimado foi de 3,1 milhões de toneladas, constituindo uma nova safra recorde no Brasil. Essa estimativa de aumento se deveu, principalmente, ao milho segunda safra, também chamado de safrinha, cuja produção deve alcançar 38,5 milhões de toneladas, uma colheita 72% maior. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012).

2.2 Deficiência hídrica na cultura do milho

O rendimento produtivo das espécies sob estresse está bem aquém dos seus potenciais de produtividade, dentre as quais se encontra o milho, caracteristicamente, pouco tolerante ao déficit hídrico e cujo cultivo em regiões semi-áridas, como o Nordeste brasileiro, é de suma importância não só para suprir diretamente as necessidades alimentares da população, mas, também da agroindústria regional (CANTARELLA, 1993; RAIJ et al., 1998).

Sempre que um solo não estiver saturado, nele existem ar e interfaces água/ar (meniscos) que lhe conferem o estado de tensão (pressão negativa). Assim, a água no solo, via de regra, encontra-se sob tensões. A tensão da água no solo, expressa pelo seu potencial matricial, é resultante da afinidade da água com a matriz do solo, em virtude das forças de adsorção e de capilaridade (GOMIDE, 2000).

Utilizando-se a tensão de água no solo como critério de manejo, a irrigação deve ser realizada toda vez que a tensão atingir um determinado valor crítico que não afete o desempenho da cultura. Segundo Morgan, Parsons e Wheaton (2001), o conteúdo de água do solo deve ser mantido entre certos limites específicos acima e abaixo, onde a água disponível para a planta não é limitada, enquanto a lixiviação é prevenida.

O potencial de referência para se efetuar a irrigação é variável de acordo com o clima local e a época de plantio. Estudos de Resende et al. (2008) indicam o potencial de -70 kPa em condições de verão nos Cerrados e em qualquer época no semi-árido e de -300 kPa no inverno nos Cerrados. Porém, cada caso deve ser estudado em suas condições peculiares.

Muitas regiões agrícolas do mundo estão sofrendo sérios problemas com a escassez de água, como a China, a Índia, e os EUA, três grandes produtores mundiais de grãos (ZHAO et al., 2010). Em espécies como o milho, arroz, trigo

e soja, têm sido observadas perdas associadas à deficiência hídrica em torno de 50% na produtividade de grãos (SURIYAN CHA-UM et al., 2010). No Brasil, por exemplo, regiões produtoras do Sul, responsáveis por mais de 40% da produção nacional de soja, perderam mais de 25% da produção nas últimas safras em razão da seca (NEPOMUCENO et al., 2001).

Entre as culturas de interesse econômico para o Brasil, destaca-se a de milho (*Zea mays* L.), a qual assume relevante papel socioeconômico e constitui-se em matéria-prima impulsionadora de diversos complexos agroindustriais (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000). Essa é uma cultura de rendimento muito variável, em função de déficits hídricos causados por variações climáticas, cujo efeito depende da intensidade, época e duração quanto ao ciclo de crescimento e desenvolvimento da planta (CUNHA; BERGAMASCHI, 1992).

À medida que se desenvolvem estratégias de irrigação, torna-se importante conhecer o efeito da deficiência hídrica nos estádios de desenvolvimento das plantas. Na planta, tanto o crescimento quanto o desenvolvimento e a translocação de fotoassimilados encontram-se ligados à disponibilidade hídrica do solo (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000). No processo de fotossíntese, a falta d'água influencia na deposição de matéria seca, limitando a disponibilidade de CO₂ e os processos de alongação celular (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1993).

Em condições de água facilmente disponível às plantas, a cultura do milho apresenta um consumo médio de água de 573 mm, mostrando grandes necessidades diárias no período compreendido entre o pendoamento e o espigamento. Isso faz com que essa cultura seja muito sensível ao déficit hídrico, durante as fases fenológicas de florescimento e início da formação de grãos (FORNASIERI, 1992).

Bergonci et al. (2001), relacionando o déficit hídrico com a redução do número de grãos por espiga, concluíram que o déficit hídrico que ocorre no período vegetativo interfere pouco no rendimento, pois não afeta, significativamente, o número de grãos por espiga. Silva (2000) observou que o estresse hídrico, logo após o estabelecimento do número de grãos, reduziu o período de enchimento de grãos, mas não alterou a taxa de acúmulo de matéria seca, tanto no endosperma quanto no embrião.

Dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, e quatro a oito dias no estágio de enchimento de grãos diminuem em mais de 50%. O aumento na deposição de matéria seca nos grãos está intimamente relacionado à fotossíntese e, uma vez que o estresse afeta este processo, reduz a produção de carboidratos, implicando em menor acúmulo de matéria seca nos grãos (MAGALHÃES et al., 2002).

O solo e a atmosfera são os constituintes físicos do ambiente no qual a maioria das espécies vegetais de interesse agrônomo cresce e se desenvolve. São eles que fornecem, de forma natural, as substâncias necessárias ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, regulando a magnitude desses processos com o concurso da energia disponível no meio (ANGELOCCI, 2002).

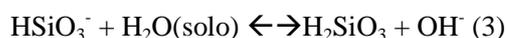
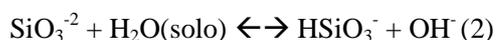
A restrição causada pela baixa disponibilidade de água do solo ou pela alta demanda evaporativa acionam certos mecanismos bioquímico-fisiológicos que permitem aos vegetais tolerar essas limitações climáticas. Dentre os mecanismos que contribuem para a tolerância à seca, os que têm sido discutidos pela comunidade científica é o ajustamento osmótico. Esse, por sua vez, inclui adaptações fisiológicas e bioquímicas de mecanismos que mantêm o turgor celular em condições de baixo potencial hídrico celular, pelo acúmulo e translocação de solutos compatíveis nas células (VERSLUES et al., 2006).

2.3 Silício como elemento benéfico ao estresse hídrico

De acordo com Epstein (1994), o silício pode reduzir o estresse hídrico e reduzir a transpiração em plantas. Especificamente com relação à deficiência hídrica, o efeito benéfico do Si tem sido associado ao aumento da capacidade de defesa antioxidante (GONG et al., 2005; ZHU et al., 2005), e manutenção da taxa fotossintética e da condutância estomática da planta (HATTORI et al., 2005), em virtude da redução da transpiração por meio da cutícula (MA; YAMAJI, 2006).

Nas plantas, esses efeitos benéficos são atribuídos à alta acumulação de sílica nos seus tecidos (FENG, 2004). O efeito protetor mecânico do silício nas plantas é atribuído, sobretudo, ao seu depósito na forma de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) na parede celular. Esse acúmulo de sílica nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular que, pela diminuição da transpiração, faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor (KORNDÖRFER, 2004).

Na solução do solo, o H_4SiO_4 comporta-se como um ácido muito fraco, de forma que, em pH 7, apenas 0,2% ioniza-se na forma carregada negativamente $\text{SiO}(\text{OH})^{-3}$, diminuindo o grau de ionização com o aumento do pH (MCKEAGUE; CLINE, 1963). Segundo Alcarde (1992), a ação neutralizante do silicato pode ser explicada de acordo com as seguintes reações:



Em associação a esses efeitos benéficos à fisiologia das plantas, deve-se considerar, ainda, que a aplicação de silicatos de Ca e Mg diminui a acidez do

solo (CAMARGO et al., 2007), em função da presença de agente neutralizante da acidez, como o SiO_3 (ALCARDE, 1992); aumenta a disponibilidade de Ca, Mg (RAMOS et al., 2006) e P (PRADO; FERNANDES, 2001); aumenta, ainda, o teor de Si no solo (CAMARGO et al., 2007), refletindo em incremento da produtividade de culturas.

Em casos de estresses salinos, o silício, também, pode ser benéfico. A concentração de sódio na parte aérea da planta diminui, sensivelmente, quando se adiciona silício em substratos com carência neste elemento (FARIA, 2000). O silício, também, influencia os fatores abióticos como estresse hídrico, toxicidade a metais, danos em virtude da radiação, balanço de nutrientes, altas temperaturas. Segundo Tisdale, Nelson e Beaton (1993), em cana-de-açúcar, há evidência que o Si pode desempenhar importante papel na proteção de folhas a danos da radiação ultravioleta funcionando como filtro.

Cultivos intensivos, com aplicações pesadas de nitrogênio e potássio, necessitam de adubação complementar com silício. O papel do silício no manejo do solo será cada vez mais importante para uma maior produtividade e sustentabilidade, à medida que os agricultores tiverem acesso a fontes silicatadas (KORNDÖRFER et al., 1999).

Indiretamente, o menor crescimento das plantas, em razão da salinidade, também, tem sido atribuído à redução na absorção de alguns dos principais nutrientes, estando a Ca e o K entre os mais bem documentados (RENGEL, 1992; LACERDA, 2000).

2.4 Respostas fisiológicas do milho sobre deficiência hídrica

Na cultura do milho, o déficit hídrico causa reduções acentuadas na produtividade. Um correto monitoramento do conteúdo hídrico nas plantas é importante, em virtude da possibilidade de uma rápida intervenção para suprir

essas deficiências. Como um bom indicador do status de água na planta, pode ser citado o potencial de água na folha (Ψ_w), sendo o seu monitoramento importante nas decisões sobre irrigação. Atualmente, entretanto, não há disponibilidade de métodos expeditos para determinação do Ψ_w folha em campo (CONSULTATIVE GROUP INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH - CGIAR, 2002). Bergonci et al. (2000) citam que o potencial de água na folha, utilizado como indicador da condição hídrica das plantas, pode ser uma ferramenta importante no monitoramento da disponibilidade de água no solo e da necessidade de irrigação.

Inúmeras variáveis fisiológicas, tais como nível de ácido abscísico, fotossíntese líquida, transpiração e condutância estomática, dentre outras, são correlacionadas com o status de energia da água na planta e seus componentes, em nível celular, daí o interesse da avaliação dessa variável em estudos das relações hídricas das plantas (HSIAO, 1973). O controle de água na planta é realizado, principalmente, pelos estômatos, cuja condutância é modulada, em geral, pela diferença na pressão de vapor entre o ambiente e a planta e por sinalizadores endógenos, notadamente o ácido abscísico (WENSUO et al., 1996).

Os reguladores de crescimento endógenos, além de modularem a condutância estomática e, conseqüentemente, a temperatura da planta, promovem alterações como o murchamento e o enrolamento das folhas. A deficiência hídrica nos tecidos vegetais, causado pela excessiva demanda evaporativa ou pelo limitado suprimento de água no solo, afetam todos os aspectos do crescimento e desenvolvimento dos vegetais (KRIEG, 1993).

Para a planta, a capacidade de abertura estomática influencia, sensivelmente, a taxa de desidratação, principalmente, em razão do conteúdo de água das folhas ser limitado e influenciado pela taxa de transpiração (FERREIRA, 1997). Quando o ambiente apresentar déficit hídrico, as plantas

podem utilizar mecanismos de tolerância como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados.

Com o déficit hídrico, os solutos da célula ficam concentrados, tornando mais negativo o seu potencial osmótico (PATAKAS et al., 2002). Uma das primeiras tentativas de manter o nível hídrico no interior da planta é o fechamento dos estômatos, porém, a consequência desse evento fisiológico é a restrição das trocas gasosas entre o interior da folha e a atmosfera, causando redução na assimilação de CO₂, utilizado no processo fotossintético (LARCHER, 2000).

Dentre as muitas respostas dos vegetais à deficiência hídrica, existem aquelas consideradas nocivas e outras favoráveis. Dentre as nocivas, encontra-se o desbalanço metabólico, com aumento da produção de Espécies Reativas de Oxigênio - EAO na planta, que podem levar à morte da planta (NOCTOR, 2002).

Como respostas favoráveis encontram-se o aumento da síntese de compostos antioxidantes com o ácido ascórbico, glutatona, carotenos, fundamentais para a adaptação da planta a estas condições (YORDANOV, VELIKOVA; TSONEV, 2000). O estudo destas respostas favoráveis é importante para o aumento da produção agrícola, não só nas áreas de máxima produtividade (BRUCE EDMEADES; BARKER, 2002), mas, sobretudo, em áreas marginais para a agricultura (WINKEL PAYNE; RENNO, 2001).

As mudanças climáticas globais antropogênicas poderão causar aumento da temperatura do ar e secas mais frequentes e aquelas respostas favoráveis para a sobrevivência do vegetal sob desidratação, são encaradas como mecanismos de adaptação à seca (SARMIENTO; WOFSY, 1999).

Várias enzimas estão envolvidas no mecanismo de proteção ao estresse hídrico, como a atividade da superóxido dismutase, catalase e o aminoácido prolina. A prolina é um aminoácido sintetizado, a partir do glutamato e da

arginina sob condições fisiológicas normais, sendo o glutamato o caminho preferencial sob condições de estresse (CHEN; KAO, 1993). Esse aminoácido teria a função de proteger as células dos processos de desnaturação sob condições de estresse mineral, em função da alta solubilidade em água.

A eficiência no uso da água (EUA) é considerada o componente mais importante de adaptação à seca. Esse parâmetro e suas interrelações com a produtividade são, muitas vezes, confundidos com a tolerância à seca. Na seleção para a tolerância a seca ou à EUA as estratégias são diferentes, bem como os materiais obtidos. A planta pode ser avaliada quanto à EUA tanto do ponto de vista fisiológico quanto agrônômico (BÄNZINGER et al., 2000).

2.5 Respostas anatômicas do milho a deficiência hídrica

A anatomia vegetal clássica trata da estrutura interna dos órgãos vegetais e, em um enfoque mais moderno, pela chamada anatomia ecológica, são estudadas as modificações que ocorrem na estrutura interna da planta, em função de pressões ambientais, possibilitando a adaptação do organismo a aquelas condições ou demonstrando sensibilidade a tais situações (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009).

Em função deste tipo de pressão, os tecidos foliares podem exibir modificações, na proporção e espessura da epiderme, podendo modificar características como: a densidade estomática, índice estomático, tamanho do estômato, da cutícula, do parênquima paliçádico, do parênquima esponjoso e modificações nos tecidos vasculares. Essas modificações ocorrem, em função dos estresses hídrico, salino, radiação (COSTA; MORAES, 2009).

A sobrevivência e o crescimento das espécies, submetidas a diferentes condições hídricas do solo, devem-se a alterações em características anatômicas e fisiológicas ou adaptações metabólicas. De acordo com a caracterização

anatômica, descrita por Laetsch (1974) e Hattersley (1992), setária e paspalo são espécies com mecanismo fotossintético C₄.

As alterações anatômicas, decorrentes da baixa disponibilidade de água no meio, geralmente, estão envolvidas na proteção das plantas contra a perda de água para o ambiente e dessecação de células corticais assim como na manutenção da condução de água no xilema (PITMAN et al., 1983, BARUCH; MÉRIDA, 1995, VASELLATI et al., 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e instalação do experimento

O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia, setor Água e Solo, em casa de vegetação do tipo pavilhão, com estrutura metálica, cobertura plástica e sombrite nas laterais. O clima é do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen e caracterizado por temperatura média anual do ar de 19,4°C, umidade relativa média do ar de 76,2% e precipitação 1529,7 mm (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

3.2 Cultivar de milho

Utilizou-se no experimento a cultivar de milho BR 106, obtida a partir de milhos tropicais da raça Tuxepeño, de porte alto e grãos de cor amarela (Centralmex, Dentado Composto e Maya), cruzados com a variedade precoce Tuxpeno1, de porte baixo e grãos de cor branca (Gráfico 1 B). Apresenta ciclo médio do plantio até 50% do florescimento masculino em 65 dias; altura média das plantas 2,40 m; altura da inserção da espiga 1,35 m; diâmetro médio da espiga 4,8 cm; comprimento médio da espiga 16 cm; diâmetro médio do sabugo 2,8; produtividade média 5500 kg ha⁻¹ e adaptação a todas as regiões do País (EMBRAPA, 2013).

3.3 Delineamento experimental

O experimento foi implantado em vasos de 15 dm³, dispostos no delineamento em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial (5x5), com quatro repetições. Os tratamentos e a quantidade de calcário e silicato de cálcio

foram, assim, constituídos (Tabela 1): cinco proporções de corretivos (0% silicato de cálcio e 100% de carbonato de cálcio; 25% de silicato de cálcio e 75% de carbonato de cálcio; 50% de silicato de cálcio e 50% de carbonato de cálcio; 75% de silicato de cálcio e 25% carbonato de cálcio; 100% de silicato de cálcio e 0% carbonato de cálcio) e cinco lâminas de irrigação (30, 70, 100, 130, 160% da lâmina recomendada). A indução dos tratamentos na aplicação da lâminas de irrigação iniciou aos 15 dias após o plantio.

Tabela 1 Proporções e quantidades de silicato de cálcio e calcário aplicados em vaso de 15 dm⁻³

Tratamento	CaSiO₃ (15 dm⁻³)	Tratamento	CaCO₃ (15 dm⁻³)	CaCl₂
% CaSiO ₃	----g vaso----	% CaCO ₃	----g vaso----	g vaso
100%	12,20	0%	0	0
75%	9,14	25%	2,63	1,03
50%	6,09	50%	5,25	2,05
25%	3,05	75%	7,88	3,1
0%	0	100%	10,50	4,10

3.4 Caracterização física e química do solo

O solo foi coletado no Campus da Universidade Federal de Lavras, sendo classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006) de classe textural argilosa. O mesmo foi submetido à tamisação, utilizando peneira com malha de 5 mm, em seguida submetido às análises de caracterização física e química nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo. Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os resultados das análises de caracterização física e química do solo.

Tabela 2 Análise química e física do solo antes da adubação realizada no Departamento de Ciência do Solo, DCS/UFLA, Lavras, MG, 2013

Caracterização química do solo																	
pH (H ₂ O)	P	K	Si	Zn	Cu (mg dm ⁻³)	Mn	S	B	Fe	P _{rem} (mg L ⁻¹)	Ca	Mg	Al (cmol _c dm ⁻³)	H+Al	T	m	V (%)
5,0	53,7	20	2,7	0,6	1,3	17,7	6,7	0,1	31,1	36,3	1,5	0,4	0,5	3,6	5,6	20,4	35,1
Caracterização física do solo																	
Argila				Silte (%)				Areia				MO (dag kg ⁻¹)					
49				13				38				2.1					

Fonte: Laboratório de Análise de Solo e de Física do Solo-DCS/UFLA

3.5 Adubação de base

Após a incubação do calcário e do silicato de cálcio, que ocorreu após 30 dias, realizou-se a adubação para os macro e micronutrientes, seguindo a recomendação de Novais et al. (1991) adaptada para experimentos conduzidos em vasos (Tabela 3). Destaca-se que foi aplicado cálcio na formulação cloreto de cálcio, juntamente com calcário, para equilibrar a quantidade desse elemento nos tratamentos. Após a aplicação dos tratamentos, o solo permaneceu sob incubação por 45 dias.

Tabela 3 Nutrientes, concentrações requeridas, fonte das mesmas, utilizadas para a adubação básica do solo

Nutrientes	Quantidade (mg de Nutr./Kg de solo)	Fonte
N	300	NH ₄ H ₂ PO ₄
P	300	KH ₂ PO ₄
K	200	KH ₂ PO ₄
S	40	K ₂ SO ₄
Mg	46	MgSO ₄ .7H ₂ O
B	2,5	H ₃ BO ₃
Cu	7,5	CuSO ₄ 5H ₂ O
Mo	0,5	(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ 4 H ₂ O
Zn	2,5	ZnSO ₄ 7H ₂ O

Fonte: Novais et al., (1991)

Após a aplicação dos tratamentos (CaSiO₃ e CaCO₃) e adubação de base procedeu-se a uma nova análise do solo, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 Análise química após a incubação do solo e adubação de base

Associações de Corretivos		Macronutrientes											
CaSiO ₃ (%)	CaCO ₃	pH H ₂ O	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	P _{rem} (mg L ⁻¹)	Ca	Mg	Al (cmol _c dm ⁻³)	H+Al	T	m	V (%)	MO (dag kg ⁻¹)
0	100	5,3	118,1	139	27,3	3,5	1,1	0,1	3,6	8,6	2,0	57,8	2,6
25	75	5,2	114,7	122	34,1	3,5	1,1	0,1	3,6	8,6	2,0	57,8	2,6
50	50	5,1	143,6	131	38,3	3,2	1,2	0,1	3,6	8,4	2,1	56,8	2,6
75	25	5,3	125,0	109	39,4	2,9	1,0	0,1	3,6	7,8	2,4	53,4	2,6
100	0	5,2	121,5	150	37,2	2,5	1,0	0,1	4,0	8,0	2,5	49,4	2,6

Fonte: Laboratório de Análise de Solo-DCS/UFLA

3.6 Caracterização hídrica do solo

Para a caracterização hídrica do solo foi determinada a sua curva característica de retenção de água (Gráfico1). Os parâmetros da curva de retenção de água no solo, usados na quantificação da lâmina de irrigação e, também, no manejo da irrigação foram obtidos com base no modelo proposto por Genuchten (1980), com auxílio do aplicativo Solver do software Microsoft Office Excel®.

$$\theta = 0,4215 \times [1 + (0,2040 \times |\Psi_m|)^{1,8757}]^{-0,4669} + 0,2670 \quad (1)$$

Em que:

θ = umidade atual $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

Ψ_m = tensão, kPa.

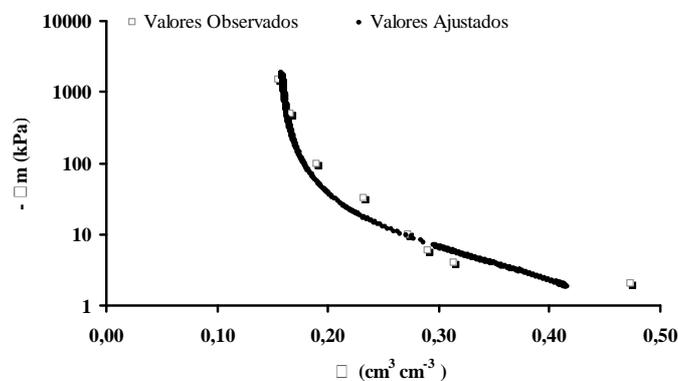


Gráfico 1 Curva característica de retenção de água do Latossolo Vermelho utilizado no experimento

A capacidade de campo foi estimada como sendo equivalente à tensão e à umidade no ponto de inflexão da curva de retenção, conforme proposição de Dexter (2004):

$$\Psi_m = 1/\alpha [1/m]^{1/n} \quad (2)$$

Em que:

Ψ_m = tensão no ponto de inflexão da curva, kPa;

α , m e n = parâmetros de ajuste da equação do modelo proposto por Genuchten (1980).

$$\theta_i = (\theta_s - \theta_r) \times [1 + 1/m]^{-m} + \theta_r \quad (3)$$

Em que:

θ_i = umidade no ponto de inflexão da curva, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

θ_s = umidade de saturação $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

θ_r = umidade residual $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

m = parâmetro de ajuste da equação do modelo proposto por Genuchten (1980)

O valor de umidade na capacidade de campo encontrado foi de 0,3458 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para uma tensão de 4,25.

3.7 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado, considerando-se a curva característica de retenção de água pelo solo e leituras de tensiômetros instalados na profundidade de 0,20 m. No estabelecimento dos diferentes tratamentos, a

irrigação foi calculada com base na umidade da capacidade de campo, conforme recomendado por (GUERRA, 1994). As leituras foram realizadas, diariamente, às 17 horas. Também foram instalados dispositivos denominados de Watermark (Soil Moisture Meter), para quantificar o potencial matricial nas maiores tensões, correspondentes às irrigações de 30 e 70% da lâmina recomendada que serviu apenas para acompanhar a variação da tensão, não sendo utilizada para o manejo da irrigação. O volume de água a ser aplicado pela irrigação foi calculado pela equação abaixo:

$$V = (\theta_{cc} - \theta_{trat}) \times V_{Solo} \quad (3)$$

Em que:

V = volume de água a ser aplicado, em mL;

θ_{cc} = umidade na capacidade de campo, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;

θ_{trat} = umidade na tensão do tratamento, em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;

V_{solo} = volume de solo, em dm^3 .

Para a aplicação das lâminas, foi montado um sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes da marca Netafin, com vazão de 4 L h^{-1} . As linhas laterais tinham início no cabeçal de controle sendo composto por fonte de água pressurizada por gravidade. Para a conexão dos gotejadores, a linha lateral utilizou microtubos flexíveis. No final da linha foi adicionado um manômetro para determinar a pressão (Figura 1).



Figura 1 Sistema de irrigação montado para o manejo da irrigação condução do experimento

Após a montagem do sistema de irrigação, realizou-se a avaliação da uniformidade da vazão, determinação da vazão nominal do gotejador e do coeficiente de uniformidade (CU) de distribuição de água do sistema de irrigação, adaptando-se o procedimento recomendado por Bralts & Kesner (1983), por meio da equação:

$$CU = (q_{25\%} / q_{\text{média}}) \quad (4)$$

Em que:

CU= coeficiente de uniformidade da vazão;

$q_{25\%}$ = média de 25% das menores vazões, $L h^{-1}$;

$q_{\text{média}}$ = vazão media geral, $L h^{-1}$.

Durante o período experimental, o CU apresentou um valor médio de 0,93. Tal resultado está de acordo com os valores recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1986). Além do coeficiente de uniformidade, foi determinado, também, o coeficiente de variação total de vazão (CVt), conforme metodologia apresentada por Bralts e Kesner (1983).

Visando monitorar e caracterizar as condições meteorológicas, durante o experimento, foi instalado no centro da casa de vegetação um termo-higrômetro digital portátil e, também, um tanque classe A. As leituras foram realizadas, diariamente, às 17 horas. No entanto estas leituras não foram utilizadas para o manejo da irrigação.

3.8 Temperatura do solo

Foram realizadas, diariamente, leituras da temperatura do solo utilizando o aparelho Thermocouple marca Digi-Sense “Thermometer”.

3.9 Condutividade elétrica da solução do solo

A condutividade elétrica foi determinada no extrato da pasta saturada conforme proposição de Richards (1954). Para tanto, o solo foi peneirado em peneira dois mm e deixado em repouso por 24 h para secar ao ar. Em recipientes plásticos, com capacidade para 1200 mL, foram adicionados 800,0 g de solo seco ao ar e 500 mL de água destilada. Depois foram misturados virando uma pasta e, após mistura, o recipiente foi coberto com papel alumínio ficando em repouso por 24 h. Após este período, a pasta foi novamente agitada, ficando em repouso por 1 h. Por meio da filtragem a vácuo da pasta de saturação, foi extraída a solução do solo, em seguida foi aferida a leitura da condutividade

elétrica (C.E.). A condutividade elétrica da pasta saturada foi corrigida considerando a curva característica de retenção da água no solo.

$$C.E._{C.P.S.} = CE_{ps} \times U_{cc}/U_{cr} \quad (5)$$

Onde:

C.E.C.p.s.= Condutividade elétrica corrigida pelo método de pasta saturada.

CE_{ps}= Condutividade elétrica obtida pelo método de pasta saturada.

U_{cc}= Umidade do solo próximo à capacidade de campo.

U_{cr}= Umidade do solo com base na curva característica de retenção da água no solo.

3.10 Avaliações Biométricas das Plantas

3.10.1 Altura das plantas

Foram avaliadas as alturas das plantas (m), com auxílio de uma trena, medindo-se a distância entre a base do colo da planta até a extremidade da haste principal antes do pendão. A avaliação da altura teve uma frequência quinzenal a partir do plantio.

3.10.2 Diâmetro do colmo das plantas

O diâmetro do colmo nas plantas de milho foi determinado no início e no final do experimento.

3.10.3 Número de folhas por planta

O número de folhas foi avaliado, também, quinzenalmente, a partir do plantio, sendo padronizada a contagem em folhas totalmente expandidas.

3.10.4 Matéria seca da raiz, caule, folhas, sabugo e grãos

Para determinação da massa de matéria seca (MMS) das plantas de milho, foram coletados raiz, caule, folha, sabugo e grãos. As raízes foram separadas da parte aérea, por meio de um corte no colo da planta, lavadas com água corrente e pressão para retirar o excesso de solo aderido. Todos os componentes foram secos em estufa a 60°C, com ventilação forçada, até atingirem massa constante.

3.10.5 Componentes da produção das plantas

Nesta etapa foram avaliados número fileiras e colunas de grãos na espiga, comprimento da espiga, peso de 100 sementes e produção.

3.11 Avaliação nutricional das plantas

Amostras do caule, folhas, palha da espiga, sabugo e grãos foram analisadas quanto à composição mineral aos 105 dias após o plantio. As análises foram conduzidas no laboratório de nutrição mineral de plantas do Departamento de Ciência do Solo-UFLA conforme metodologias descritas por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

A quantificação do silício no caule, folhas, palha da espiga, sabugo e grãos realizada foi feita pelo método colorimétrico do azul de molibdênio no

laboratório de nutrição mineral de plantas do Departamento de Ciência do Solo-UFLA segundo (FURLANI; GALLO, 1978).

3.12 Microscopia Eletrônica de Varredura/Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva nas folhas de milho

Foram coletadas aos 75 dias, após o plantio, folhas de milho padronizando as totalmente expandidas. Essas folhas foram fixadas em Karnovsky (modificado) e mantidas em câmara fria (4°C) por um período mínimo de 24 horas. O preparo das amostras foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), segundo o protocolo do LME, para posterior análise em Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva (MEV/EDS).

As amostras pré-fixadas foram transferidas para glicerol, por um período de 30 minutos e, posteriormente, foram efetuados os cortes em nitrogênio líquido (criofratura). As amostras foram desidratadas em gradiente crescente de etanol (25, 50, 75, 90, 95 e 100%, por 10 minutos, esta última por duas vezes) sendo, em seguida, levadas para o aparelho de ponto crítico modelo Baltec CPD 030, onde se completou a secagem. As amostras foram montadas em stubs, metalizadas no aparelho evaporador de carbono modelo Union CED 020 e observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss e qualificadas/quantificadas quanto à composição química por Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva no aparelho Quantax XFlash 5010 Bruker.

3.13 Eficiência no Uso da Água (EUA)

3.13.1 Quantificação do EUA fisiológico (EUA_f)

Fisiologicamente, a EUA representa a relação entre a taxa de assimilação do CO₂ e a taxa de transpiração do milho (BÄNZINGER et al., 2000):

$$EUA_f = P_a/P_b \quad (6)$$

onde:

EUA_f = é a eficiência no uso da água, fisiologicamente

P_a = fotossíntese;

P_b = transpiração.

3.13.2 Quantificação da EUA agronomicamente

Agronomicamente a EUA é determinada tanto em função da produção de massa de matéria seca da folha do milho, como em função da produção de grãos, de acordo com as expressões abaixo:

$$EUA_f = PMMSF/V_{H_2O} \quad (7)$$

onde:

EUA_f = é a eficiência no uso da água, agronomicamente

PMMSF = massa de matéria seca da folha;

V_{H₂O} = volume de água médio (4 plantas⁻¹) usado no ciclo da cultura.

$$EUA_g = PG/V_{H_2O} \quad (8)$$

onde:

EUA_g = é a eficiência no uso da água, agronomicamente

PG = produção de grãos (g);

V_{H_2O} = volume de água médio (4 plantas⁻¹) usado no ciclo da cultura.

3.14 Avaliações fisiológicas das plantas

3.14.1 Fotossíntese e Taxa de Transpiração

Para as determinações da fotossíntese e da taxa de transpiração, foram realizadas duas medições pontuais em dois períodos fenológicos da cultura, aos 30 e 75 dias após o plantio. Foi padronizada a folha expandida onde se realizaram as leituras nas folhas das planta de milho. Para as curvas de resposta da fotossíntese à radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e à concentração de CO₂ foram realizadas medições às 6 horas da manhã. No caso das medições pontuais, a irradiância foi mantida em 1000 mmol m⁻² s⁻¹, acima da irradiância de saturação de luz das plantas controle. As taxas de fotossíntese líquida, por unidade de área foliar (A), a condutância estomática ao vapor de água (gs), a resistência estomática ao vapor de água (rs), a taxa transpiratória foliar (E), a condutância sub-estomática (CE), a temperatura da folha (Tl) e a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foram estimadas a partir dos valores da variação de CO₂ da umidade do ar no interior da câmara, utilizando o medidor portátil LI-6400.

3.14.2 Potencial hídrico foliar

A determinação do potencial hídrico do xilema da folha (Ψ_w) foi realizada em dois períodos fenológicos da cultura, aos 30 e 75 dias após o plantio. Padronizaram-se as folhas totalmente expandidas e sob luminosidade, durante o intervalo entre 6 e 14 horas, usando a técnica da câmara de pressão (SCHOLANDER et al., 1964) e seguindo as precauções recomendadas por Turner (1988). As folhas utilizadas foram cobertas com papel alumínio, em seguida, colocadas em sacos plásticos e, imediatamente, acondicionadas em casa de térmica com papel toalha molhado e com gelo conforme recomendado por (MELCHER et al., 1998)

3.15 Características anatômicas das folhas

Para avaliação das características anatômicas fragmentos da região mediana das primeiras folhas, completamente expandidas de cada planta, foram coletadas e fixadas em etanol 70%. Realizou-se a coleta aos 100 dias após o plantio. Utilizou-se micrótomo de mesa tipo LPC (com base fixa e lâmina móvel) para a obtenção das secções transversais das folhas. Foram obtidas secções paradérmicas, utilizando-se lâminas de aço, sendo realizadas manualmente. As secções foram clarificadas com hipoclorito de sódio 50% (KRAUS; ARDUIN, 1997). As secções paradérmicas foram coradas com solução de safranina 1% e as transversais com safrablau (solução de safranina 0,1% e azul de astra 1% na proporção de 7:3). As lâminas semipermanentes foram montadas em glicerol 50% e cobertas com lamínula (KRAUS; ARDUIN, 1997). As lâminas foram observadas em microscópio óptico, modelo Olympus CX41, acoplado à câmera digital (Bel Engineeing, DIV-3000), utilizada para a captura de imagens. As imagens obtidas foram utilizadas para as medições

quantitativas das características anatômicas, pelo *software* de análise de imagem UTHSCSA-Imagetool (The University of Texas Health Science Center at San Antonio), calibrado com régua microscópica fotografada nas mesmas condições das fotografias analisadas.

Foram avaliadas as seguintes características em secção paradérmica: número de estômatos, número total de células da epiderme, densidade estomática (número de estômatos por mm^2), índice estomático [(número de estômatos/número de estômatos+número de células estomáticas)*100]. Em secção transversal, foram avaliados: Espessura da epiderme das faces adaxial e abaxial das folhas, espessura do mesofilo, distância entre os feixes vasculares, diâmetro equatorial das células buliformes, diâmetro polar das células buliformes e espessura das fibras de esclerênquima.

3.16 Análises estatísticas dos dados

Os resultados encontrados nas diferentes avaliações foram submetidos à análise de variância (ANAVA). Para avaliação das médias, foram aplicados os testes de Scott-Knott ou teste-t, de acordo com as teorias preconizadas por Steel, Torrie e Dickey (2006). Os desvios padrões foram calculados e aplicados os estimadores de regressão e de correlação (Pearson ou Spearman), usando o software SISVAR, (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento ambiental no interior da casa de vegetação

A temperatura do ar está intimamente ligada ao balanço de energia, que por sua vez irá depender de fatores como tamanho, propriedades ópticas da cobertura e das condições meteorológicas locais da casa de vegetação (BURIOL et al., 1993). Durante o dia, em virtude da radiação líquida positiva, a superfície aquece a parcela de ar próximo a ela, desencadeando um processo convectivo. Dentro da mesma, este processo é interrompido pela cobertura plástica que impede a ascensão do ar quente, provocando a elevação das temperaturas, durante o período diurno, com isso, as temperaturas máximas atingem valores bem mais elevados do que no exterior (PEZZOPANE, 1995). Os valores de temperatura mínima e máxima, registrados no interior da casa de vegetação, estão apresentados (Gráfico 2). Observou-se, durante o experimento, que a temperatura máxima e mínima oscilou de 32 °C a 38 °C e 17 °C a 22 °C durante os 112 dias do cultivo. No mesmo período, a temperatura média diária variou de 25 °C a 29 °C. Esses dados climáticos sugerem que, durante a realização do experimento, a temperatura do ar foi adequada, para o desenvolvimento da cultura, haja vista que o milho produz melhor em temperaturas moderadas, entre 18 e 25 °C (DIDONET et al., 2002). Elevadas temperaturas noturnas não são benéficas para a produção do milho, pois proporcionam redução acentuada do ciclo da planta, em função do incremento do somatório térmico (FANCELLI; DOURADO NETO, 2004).

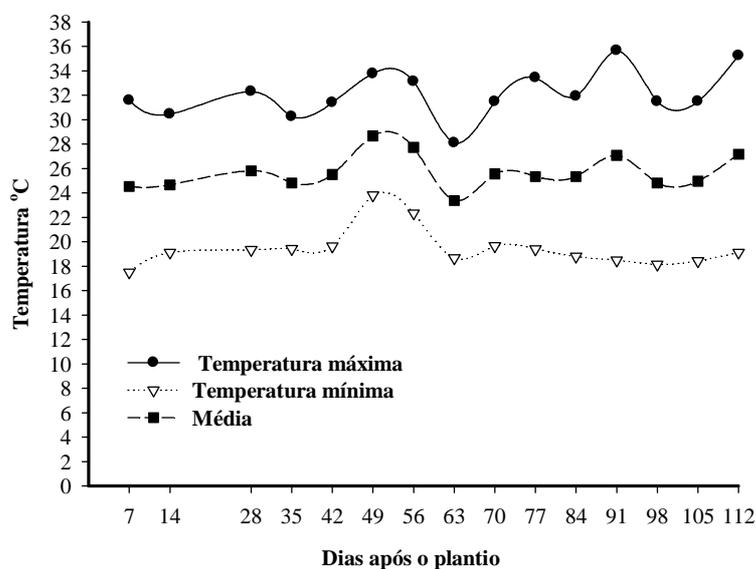


Gráfico 2 Temperatura máxima, mínima e média dentro da casa de vegetação durante o período experimental

4.2 Temperatura do solo

A temperatura do solo pode ser definida como sendo uma manifestação da intensidade de calor no solo. A temperatura do solo influencia os processos físicos, químicos e biológicos. Ainda influencia a formação de agregados, nitrificação, germinação, emergência e desenvolvimento das plântulas, desenvolvimento radicular, decomposição da matéria orgânica e atividades biológicas.

O Gráfico 3 mostra a variação da temperatura do solo nas diferentes lâminas de irrigação, dentro de cada proporção de silicato de cálcio, ao longo do período experimental. Observa-se, inicialmente, que, independentemente da proporção de silicato de cálcio, a temperatura do solo apresenta comportamento único nas várias lâminas de irrigação, ou seja, tende a diminuir com o aumento

da quantidade de água aplicada. Constata-se, ainda, uma queda na temperatura do solo no período compreendido entre 35 e 49 dias após o plantio. O Gráfico 4 compara os valores da temperatura média do solo entre as diversas lâminas de irrigação, dentro de cada proporção de silicato de cálcio. Embora não tenham ocorrido diferenças significativas nos valores das temperaturas, verifica-se, como comentado anteriormente, uma tendência de redução da temperatura com o aumento da quantidade de água aplicada. Observou-se um valor médio da temperatura do solo para as aplicações de 30 e 160% lâmina de irrigação de 31 °C e 29 °C, respectivamente.

Estes resultados estão relacionados ao calor específico da água. Depois da amônia, a água possui o mais alto valor de calor específico, $0,0754 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$, a 25°C , que representa a quantidade de energia requerida para aquecer um grama de água, de $14,5$ a $15,5^\circ\text{C}$ (NOBEL, 1999). Assim sendo, água tem por propriedade a capacidade de diminuir a temperatura do solo em relação à temperatura do ar.

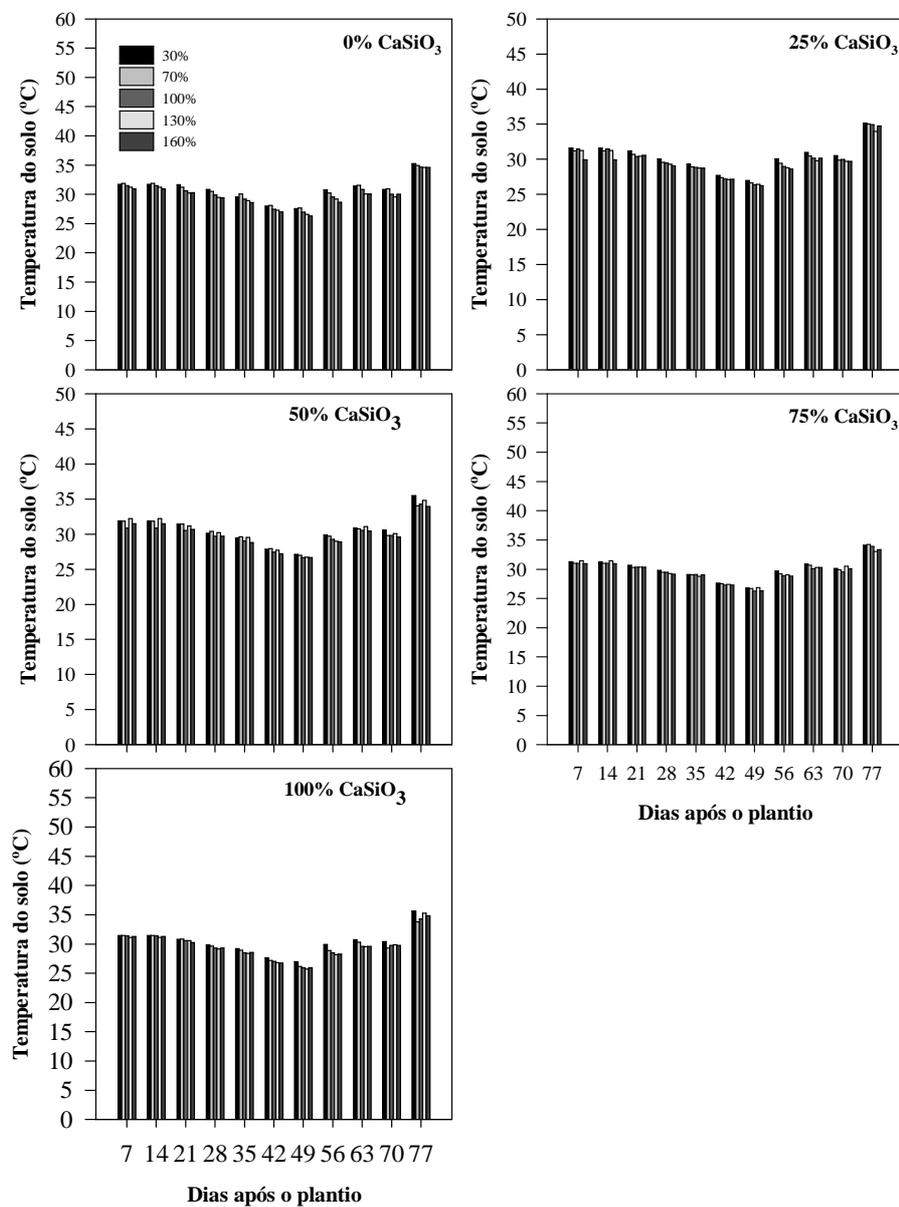


Gráfico 3 Temperatura do solo (°C) nas diferentes lâminas de irrigação, em cada proporção de silicato de cálcio, ao longo do período experimental

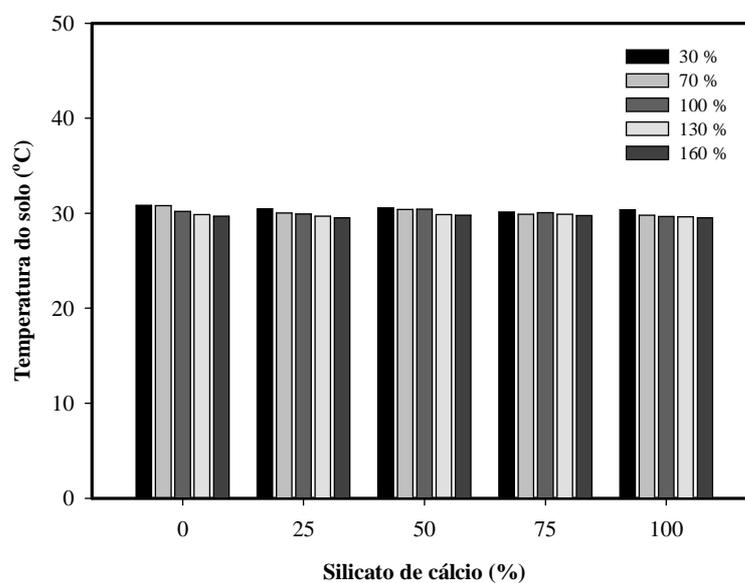


Gráfico 4 Comparação da Temperatura média do solo (°C) nas diferentes proporções de silicato de cálcio em cada lâmina de irrigação

4.3 Manejo da irrigação

No manejo da irrigação do experimento, o monitoramento da água no solo foi realizado com o uso de tensiômetros e Watermark (Soil Moisture Meter). Para tanto, fez-se necessário a calibração das leituras em relação aos teores de umidade ou tensões da água no solo, cujos resultados encontram-se ilustrados nos Gráficos 5, 6 e 7, a seguir.

Observa-se no Gráfico 5 que a tensão da água no solo varia de acordo com a quantidade de água aplicada. As maiores tensões são registradas quando se aplicaram 30% da lâmina recomendada, seguida das tensões de 70% e 100% da lâmina recomendada.

O Gráfico 6 apresenta o monitoramento do potencial matricial realizado com tensiômetro (A) e Watermark (B), durante o período experimental, antes e depois das irrigações relativas a 30, 70 e 100% da lâmina recomendada. Nota-se que, antes da irrigação, as maiores tensões da água no solo foram registradas no tratamento equivalente à aplicação de 30% da lâmina recomendada, variando de -90 a -160 kPa. Para a aplicação de 70%, a tensão no período variou de -40 a -130 kPa e para 100% de -25 a -50 kPa. Esse gradiente de tensões permaneceu com a mesma tendência depois das irrigações, todavia, quando se aplicaram 100% da lâmina recomendada, a tensão da água do solo se manteve na faixa de -5 a -30 kPa, inferiores à tensão na capacidade de campo, -40 kPa, ou seja, a quantidade de água aplicada com essa lâmina elevou a umidade do solo a um patamar acima de sua capacidade de campo. Como uma referência das condições hídricas prevalentes no experimento, tem-se o estudo de Resende et al. (2008), que indica o potencial de -70 kPa em condições de verão nos Cerrados e em qualquer época no Semiárido, e de -300 kPa no inverno nos Cerrados. Depreende-se, pois, como era objetivo do presente estudo que as aplicações de água relativas a 30 e 70% da lâmina recomendada induziram condições de déficit hídrico, sendo esse déficit muito acentuado quando da aplicação de apenas 30% da lâmina recomendada.

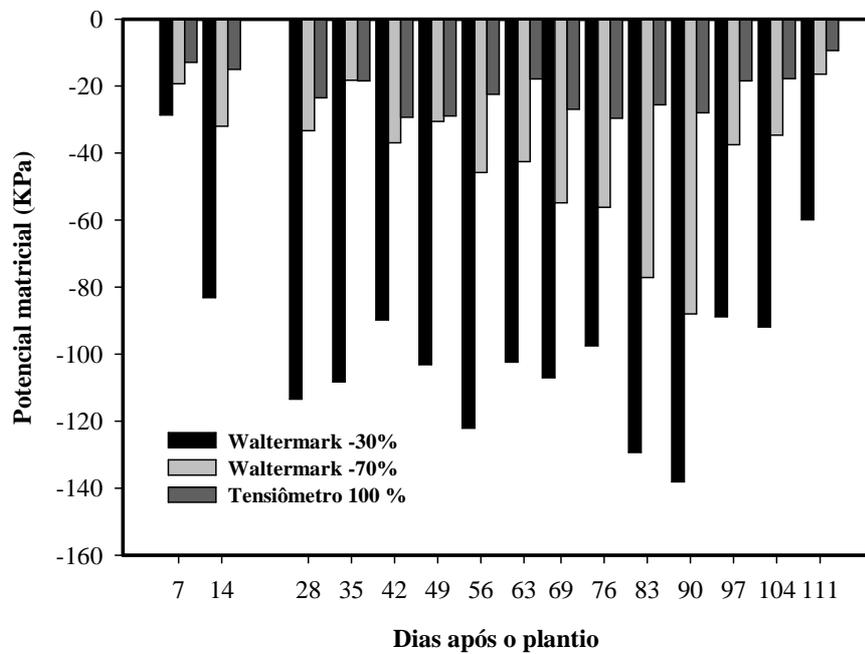


Gráfico 5 Variação do potencial matricial da água do solo ao longo do período experimental

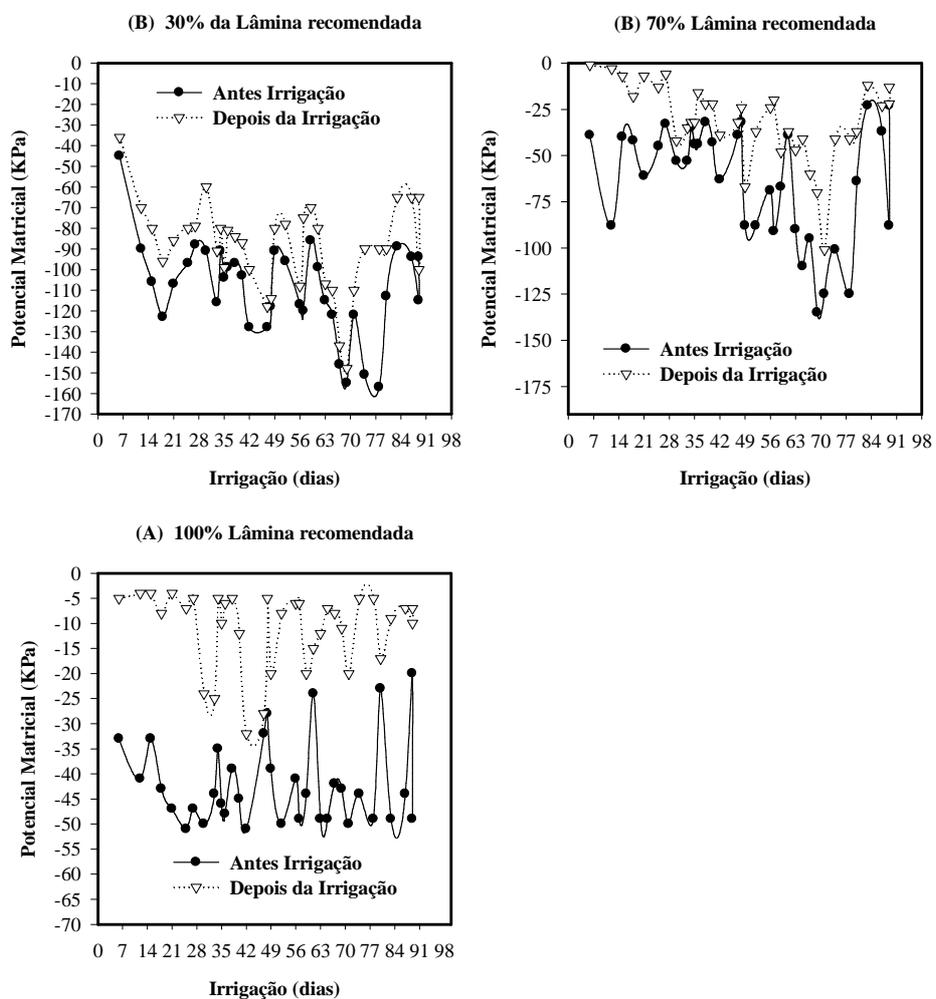


Gráfico 6 Variação do potencial matricial antes e depois da irrigação (A) tensiômetro e (B) watermark

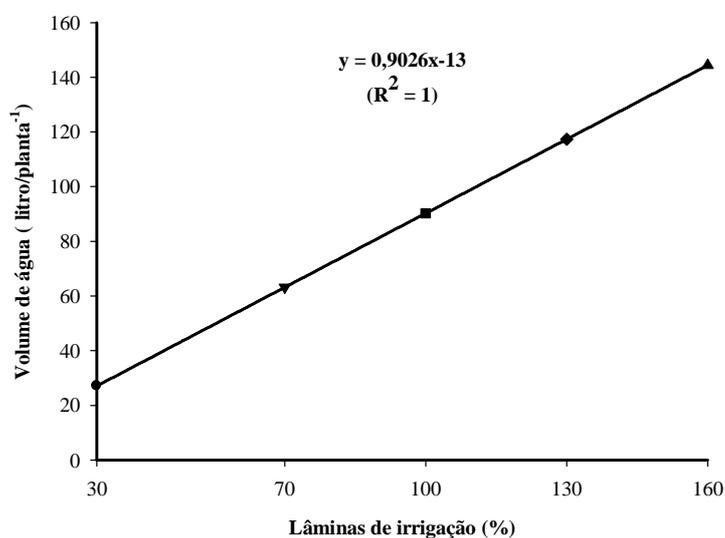


Gráfico 7 Volume médio de água (Litro/planta⁻¹) aplicado nos tratamentos durante o período experimental

O volume médio de água aplicado nas várias lâminas de irrigação durante o período experimental é ilustrado pelo Gráfico 7. Observa-se que o volume de água aumenta, linearmente, em função das lâminas de irrigação aplicadas, refletindo os diferentes gradientes hídricos produzidos no experimento.

O milho é considerado uma cultura que demanda muita água, mas também é uma das mais eficientes no uso da água, isto é, produz uma grande quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida. A cultivar de milho utilizado apresenta ciclo médio e consome de 400 a 700 mm de água em seu ciclo completo, dependendo das condições climáticas e do seu estágio fenológico. O período de máxima exigência da cultura coincide com a fase do embonecamento. Por isso déficits de água que ocorrem nesse período são os que provocam maiores reduções de produtividade. De acordo com Cruz et al. (2006),

déficit hídrico anterior ao embonecamento reduz a produtividade em 20 a 30%; no embonecamento em 40 a 50% e após em 10 a 20%.

4.4 Condutividade elétrica do solo

Os Gráficos 8 e 9 apresentam, respectivamente, o comportamento da condutividade elétrica (C.E.) do solo em função da quantidade de silicato de cálcio e da lâmina de irrigação aplicada. Deve-se destacar que esses fatores interagiram, significativamente, para o resultado final da condutividade elétrica do solo.

O Gráfico 8 ilustra a variação da C.E. em função das proporções de silicato para cada lâmina de irrigação empregada. Inicialmente observa-se que os maiores valores de C.E. ocorrem quando 30% da lâmina de irrigação são aplicados ao solo, evidenciando de forma significativa, o aumento do potencial osmótico, condicionado pelo aumento da concentração de sais. Nesse mesmo tratamento, observa-se uma resposta quadrática da C.E. à aplicação de quantidades crescentes de silicato de cálcio. Verifica-se que a C.E. atinge seu valor máximo na proporção 50% de silicato de cálcio. Nos demais tratamentos, ou seja, aplicações de 70, 100, 130 e 160% da lâmina recomendam a resposta ao aumento da proporção de silicato de cálcio foi linear e, a partir da lâmina 100%, além de serem baixos os valores de C.E., a tendência é de não resposta ou até mesmo redução daqueles valores, com o aumento das quantidades do corretivo.

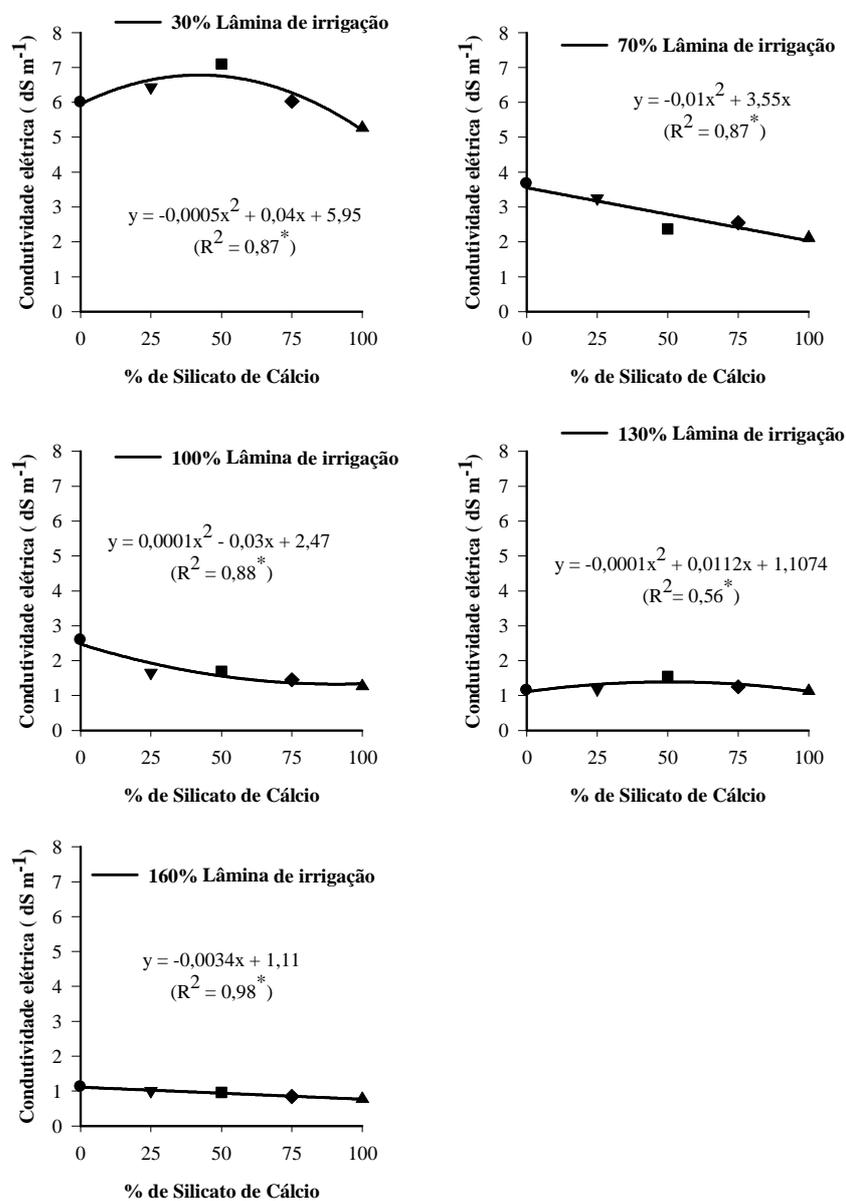


Gráfico 8 Condutividade elétrica do solo em função das proporções de silicato de cálcio em cada lâmina de irrigação

O Gráfico 8 ilustra, também, a variação da condutividade elétrica em função interação entre as lâminas de irrigação e as proporções de silicato de cálcio aplicado. Entretanto, diferentemente do Gráfico 8 o Gráfico 9 ilustra o comportamento da C.E. em função da lâmina aplicada, para cada proporção de silicato de cálcio isoladamente. Observa-se que, independentemente da proporção de silicato de cálcio, a C.E. apresenta tendência de redução de seus valores à medida que se aumenta a quantidade de água aplicada. Os maiores valores de C.E. são encontrados com a aplicação de 30% da lâmina recomendada, tem seus valores reduzidos à metade quando da aplicação de 70% da lâmina recomendada e atinge valores mínimos a partir da aplicação de 130% da lâmina recomendada. Estes resultados comprovam que a menor lâmina de irrigação aumentou a concentração de sais no solo e, como consequência, acarreta elevação do potencial osmótico da solução do solo.

Em virtude da condição de salinização do solo, podem ocorrer desordens nutricionais, induzindo relações antagônicas entre nutrientes na planta, o que reduz, significativamente, os rendimentos das culturas (GRATTANS; GRIEVE, 1999). Essas interações, também, podem ocorrer entre os nutrientes na solução do solo, afetando a disponibilidade, quais sejam: antagonismo, inibição competitiva e inibição não competitiva, além de sinergismo, o que pode causar uma dinâmica diferenciada entre cátions nas folhas e raízes das plantas.

Cuartero e Munoz (1999) observaram que a massa seca de haste, folhas e raízes de tomateiro e reduzida em condições de salinidade. A grande concentração de íons no solo pode causar o desbalanço no potencial de água e o potencial iônico na interface solo-planta e promover toxicidade no vegetal, afetando o seu crescimento e a produção de fitomassa (HASEGAWA et al., 2000; ASCH; DINGKUHN; DORFFING, 2000), em consequência da redução da absorção de nutrientes minerais, como o potássio, cálcio e manganês (LUTTS BOUHARMONT; KINET, 1999).

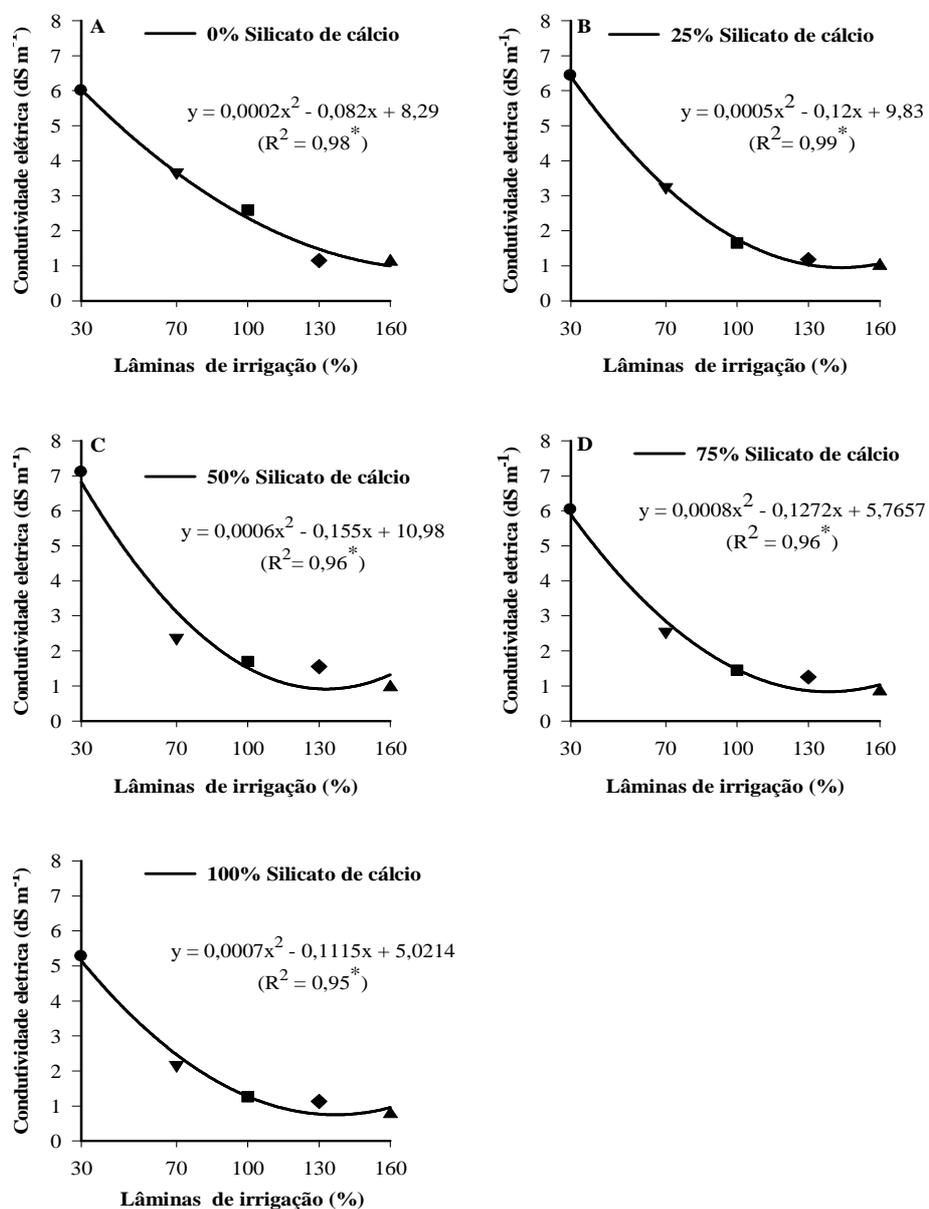


Gráfico 9 Condutividade elétrica do solo em função das diferentes lâminas de irrigação, em cada proporção de silicato de cálcio

4.5 Avaliações Biométricas das Plantas

4.5.1 Altura das plantas

Na Tabela 5 estão os resultados das avaliações do crescimento das plantas de milho, durante o período experimental, em função das proporções de silicato de cálcio e das lâminas de irrigação. As avaliações foram realizadas aos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias, após o plantio e a análise de variância revelou que o crescimento das plantas foi afetado, significativamente, pela interação dos tratamentos aplicados. Verifica-se que as diferenças nas alturas das plantas se mostraram significativas a partir dos 30 dias após o plantio e essas diferenças são reflexo, basicamente, das diferentes lâminas de irrigação aplicadas. Independentemente da proporção de silicato, verifica-se que o menor crescimento das plantas de milho ocorreu com a aplicação de 30% da lâmina recomendada, embora aos 30 dias na proporção 0% de silicato de cálcio e aos 45 dias nas proporções 0 e 50% de silicato, aplicação de 70% da lâmina tenha, também, induzido um menor crescimento das plantas em relação às aplicações de 100, 130 e 160% da lâmina recomendada. Esses resultados refletem o efeito do déficit hídrico a que foram submetidas às plantas de milho. Verifica-se, ainda, na Tabela 4 que aos 60 dias após o plantio, independentemente da proporção de silicato de cálcio, não ocorreu diferença significativa do crescimento das plantas de milho a partir da aplicação de 70% da lâmina de irrigação. Outro aspecto a ser observado nessa tabela é que as plantas de milho tiveram seus crescimentos estabilizados aos 60 após o plantio o que é definido pela fenologia das mesmas. Esse resultado reforça a necessidade de se buscar a racionalização do uso da água de irrigação, evitando-se o já consagrado elevado consumo de água característica da atividade. Excetuando-se o tratamento correspondente à aplicação de 30% da lâmina recomendada, as alturas das

plantas encontradas no presente trabalho estão de acordo com as características apresentadas para a cultivar BR106 (EMBRAPA, 2013), que apresenta altura média de 2,40 m.

Tabela 5 Altura das plantas das plantas de milho (m) aos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o plantio, em função das proporções de silicato de cálcio e lâminas de irrigação

15 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	0,19 Aa	0,17 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa	0,19 Aa
25	0,17 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa	0,16 Aa	0,18 Aa
50	0,18 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa
75	0,17 Aa	0,19 Aa	0,17 Aa	0,18 Aa	0,19 Aa
100	0,17 Aa	0,21 Aa	0,17 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa
30 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	0,30 Ab	0,38 Ab	0,48 Aa	0,46 Aa	0,48 Aa
25	0,27 Ab	0,42 Aa	0,45 Aa	0,46 Aa	0,48 Aa
50	0,28 Ab	0,41 Aa	0,49 Aa	0,48 Aa	0,49 Aa
75	0,29 Ab	0,44 Aa	0,45 Aa	0,48 Aa	0,43 Aa
100	0,28 Ab	0,42 Aa	0,40 Aa	0,43 Aa	0,43 Aa
45 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160%
0	0,69 Ac	1,05 Ab	1,32 Aa	1,29 Aa	1,38 Aa
25	0,63 Ab	1,13 Aa	1,34 Aa	1,29 Aa	1,31 Aa
50	0,67 Ac	1,13 Ab	1,40 Aa	1,39 Aa	1,42 Aa
75	0,70 Ab	1,27 Aa	1,37 Aa	1,31 Aa	1,26 Aa
100	0,64 Ab	1,06 Aa	1,16 Aa	1,45 Aa	1,21 Aa
60 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	1,75 Ab	2,25 Aa	2,64 Aa	2,57 Aa	2,41 Ba
25	1,51 Ab	2,53 Aa	2,74 Aa	2,43 Aa	2,53 Ba
50	1,68 Ab	2,45 Aa	2,76 Aa	2,65 Aa	2,99 Aa
75	1,54 Ab	2,63 Aa	2,63 Aa	2,64 Aa	2,68 Ba
100	1,59 Ab	2,42 Aa	2,56 Aa	2,53 Aa	2,42 Ba

Tabela 5, conclusão

75 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	1,78 Ab	2,27 Aa	2,67 Aa	2,60 Aa	2,42 Ba
25	1,55 Ab	2,55 Aa	2,76 Aa	2,45 Aa	2,57 Ba
50	1,69 Ab	2,47 Aa	2,79 Aa	2,68 Aa	2,99 Aa
75	1,56 Ab	2,65 Aa	2,64 Aa	2,66 Aa	2,69 Ba
100	1,61 Ab	2,44 Aa	2,58 Aa	2,55 Aa	2,45 Ba
90 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	1,78 Ab	2,27 Aa	2,67 Aa	2,60 Aa	2,42 Ba
25	1,55 Ab	2,55 Aa	2,76 Aa	2,45 Aa	2,57 Ba
50	1,69 Ab	2,47 Aa	2,79 Aa	2,68 Aa	2,99 Aa
75	1,56 Ab	2,65 Aa	2,64 Aa	2,66 Aa	2,69 Ba
100	1,61 Ab	2,44 Aa	2,58 Aa	2,55 Aa	2,45 Ba
105 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	1,78 Ab	2,27 Aa	2,67 Aa	2,60 Aa	2,42 Ba
25	1,55 Ab	2,55 Aa	2,76 Aa	2,45 Aa	2,57 Ba
50	1,69 Ab	2,47 Aa	2,79 Aa	2,68 Aa	2,99 Aa
75	1,56 Ab	2,65 Aa	2,64 Aa	2,66 Aa	2,69 Ba
100	1,61 Ab	2,44 Aa	2,58 Aa	2,55 Aa	2,45 Ba
120 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	1,78 Ab	2,27 Aa	2,67 Aa	2,60 Aa	2,42 Ba
25	1,55 Ab	2,55 Aa	2,76 Aa	2,45 Aa	2,57 Ba
50	1,69 Ab	2,47 Aa	2,79 Aa	2,68 Aa	2,99 Aa
75	1,56 Ab	2,65 Aa	2,64 Aa	2,66 Aa	2,69 Ba
100	1,61 Ab	2,44 Aa	2,58 Aa	2,55 Aa	2,45 Ba

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância

4.5.2 Diâmetro do colmo das plantas de milho

A avaliação do diâmetro do caule das plantas de milho foi realizada no início e no final do experimento, respectivamente aos 15 e 120 dias após o

plântio (Tabela 6). Observa-se que, no início do experimento, não houve diferença significativa para o parâmetro biométrico avaliado, em função das lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio. Aos 120 dias, observa-se que, independentemente da proporção de silicato de cálcio utilizada, os menores valores do diâmetro do colmo são encontrados quando da aplicação de 30% da lâmina recomendada. O caule é um órgão vegetativo das plantas vasculares, responsável pela condução de água e minerais da raiz para as folhas via xilema e das substâncias produzidas nas folhas via floema para as demais partes da planta (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). O desenvolvimento do caule é muito importante para a planta de milho para dar sustentação e não deixar que a planta quebre, durante condições de ventos, chuvas e peso da espiga. Se a planta quebrar vai prejudicar a colheita que é mecanizada.

Tabela 6 Diâmetro do colmo das plantas de milho (mm) no início e final do experimento, em função das proporções de silicato e lâminas de irrigação

15 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30%	70%	100%	130%	160%
0	10,84 Aa	10,27 Aa	11,50 Aa	10,47 Aa	10,30 Aa
25	11,25 Aa	10,43 Aa	10,32 Aa	11,90 Aa	10,70 Aa
50	12,07 Aa	11,63 Aa	10,67 Aa	12,90 Aa	12,01 Aa
75	11,49 Aa	10,64 Aa	11,77 Aa	10,51 Aa	10,64 Aa
100	9,51 Aa	11,29 Aa	9,75 Aa	10,10 Aa	9,57 Aa
120 dias após o plantio					
%Ca SiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30%	70%	100%	130%	160%
0	21,34 Ab	27,55 Aa	26,32 Aa	28,21 Aa	29,67 Aa
25	24,75 Ab	28,56 Aa	29,87 Aa	27,95 Aa	29,56 Aa
50	23,64 Ab	27,08 Aa	27,51 Aa	28,36 Aa	29,36 Aa
75	23,99 Ab	25,77 Aa	30,40 Aa	28,02 Aa	30,26 Aa
100	22,77 Ab	28,31 Aa	28,52 Aa	30,38 Aa	29,89 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância

4.5.3 Número de folhas por planta

Na Tabela 7 está apresentado os valores médios do número de folhas por planta em cada tratamento aos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o plantio. Observa-se, inicialmente, que o número de folhas aumentou com a mesma proporcionalidade em todos os tratamentos até 75 dias após o plantio. Não se verifica resposta das plantas aos tratamentos até 30 dias após o plantio. Aos 45 dias após o plantio observa-se uma redução significativa no número de folhas para a aplicação de 30% da lâmina recomendada em todas as proporções de silicato de cálcio. Aos 60 dias após o plantio, observa-se que na proporção de 0% silicato de cálcio, a aplicação de 70% da lâmina recomendada, também, levou à redução do número de folhas por planta. Estes resultados refletem de um lado os efeitos negativos do estresse hídrico no desenvolvimento das plantas de milho e de outro lado a importância da presença do silício na amenização desses efeitos.

Tabela 7 Número de folhas por planta de milho aos 15, 30, 45 e 60 dias após o plantio, em função das proporções de silicato de cálcio e lâminas de irrigação

15 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa
25	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa
50	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa
75	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa
100	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa	6 Aa
30 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa
25	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa
50	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa
75	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa
100	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa	8 Aa
45 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	12 Ab	14 Aa	14 Aa	14 Aa	14 Aa
25	12 Ab	14 Aa	14 Aa	14 Aa	14 Aa
50	12 Ab	14 Aa	14 Aa	14 Aa	14 Aa
75	12 Ab	14 Aa	14 Aa	14 Aa	14 Aa
100	12 Ab	14 Aa	14 Aa	14 Aa	14 Aa
60 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	16 Bb	16 Bb	18 Aa	18 Aa	18 Aa
25	18 Aa	18 Aa	18 Aa	18 Aa	18 Aa
50	16 Bb	18 Aa	18 Aa	18 Aa	18 Aa
75	16 Bb	18 Aa	18 Aa	18 Aa	18 Aa
100	18 Aa	18 Aa	18 Aa	18 Aa	18 Aa
75 dias após o plantio					
% CaSiO ₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	18 Bb	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa
25	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
50	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
75	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
100	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa

Tabela 7, conclusão

90 dias após o plantio					
% CaSiO₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	18 Bb	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa
25	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
50	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
75	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
100	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
105 dias após o plantio					
% CaSiO₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	18 Bb	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa
25	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
50	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
75	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
100	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
120 dias após o plantio					
% CaSiO₃	% da lâmina recomendada				
	30	70	100	130	160
0	18 Bb	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa
25	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
50	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
75	18 Bb	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa
100	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa	20 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância

4.5.4 Massa de matéria seca da raiz

A produção de matéria seca da raiz foi afetada, significativamente, pela interação % silicato de cálcio x % lâmina de irrigação e os resultados do desdobramento dessa interação são apresentados nos Gráficos 10 e 11.

O Gráfico10 apresenta o comportamento da produção de matéria seca das raízes das plantas de milho, em função da % da lâmina de irrigação, nas diversas proporções de silicato de cálcio. Observa-se que, para todas as

proporções de silicato de cálcio, a produção matéria seca da raiz é crescente com o aumento da lâmina de irrigação. Na proporção de 100% silicato de cálcio, a resposta à irrigação torna-se menos acentuada, com tendência de não resposta nas aplicações superiores a 130% da lâmina recomendada. As menores produções de matéria seca são observadas para a aplicação de 30% lâmina recomendada, para todas as diferentes proporções de silicato de cálcio. Estes resultados estão relacionados à influência negativa do estresse hídrico no desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho. Kaufmann (1972) relata um decréscimo significativo no desenvolvimento do sistema radicular de uma variedade de ervilha sob estresse hídrico, após a iniciação floral, sugerindo, também, que algumas raízes mais velhas morreram pela imposição do tratamento. Kramer (1974) concluiu, em seus trabalhos que, apesar das características adaptativas, anatômicas e funcionais observadas na parte aérea da planta, a profundidade, a distribuição e o grau de ramificação das raízes constituem fatores de extrema importância, correlacionados ao nível de tolerância à seca por parte das plantas cultivadas. Na proporção 50% silicato de cálcio, observa-se, pelo ajuste da equação quadrática ($R^2 = 0,88$), um aumento exponencial da produção da raiz a partir da aplicação de 100% da lâmina de irrigação.

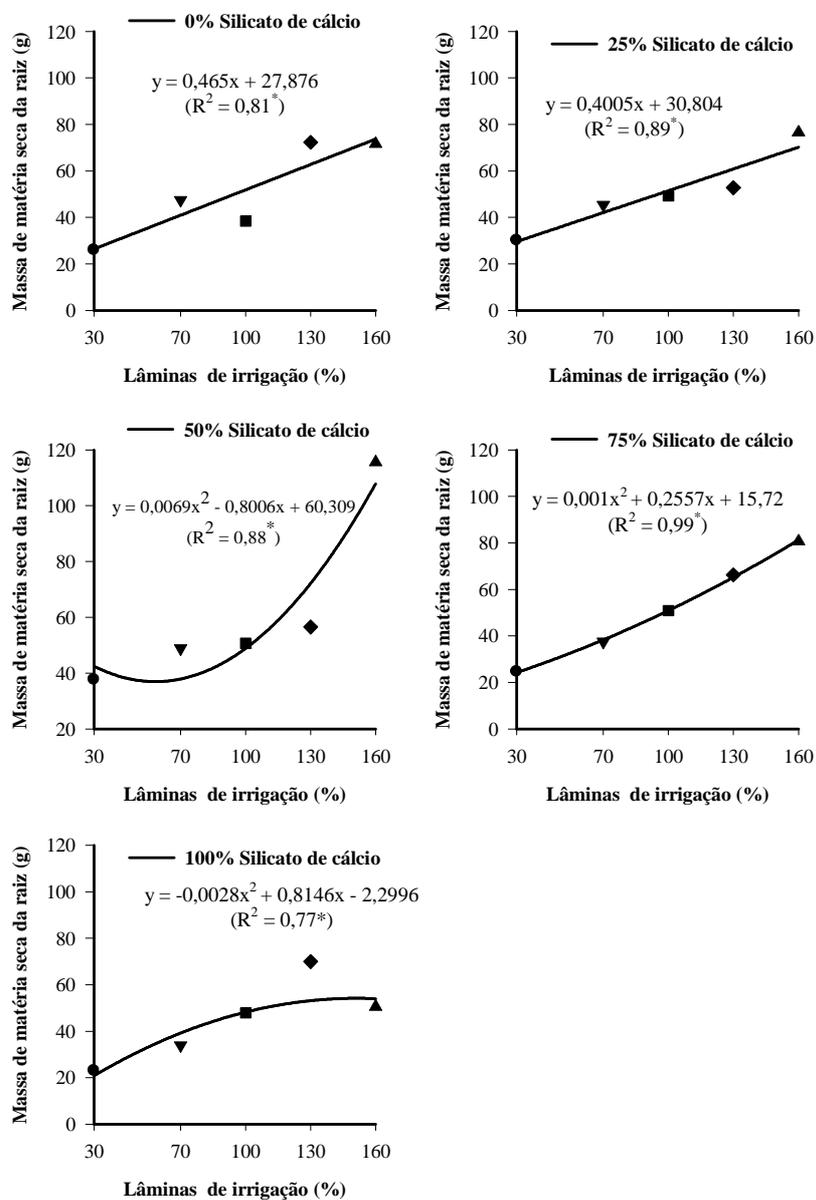


Gráfico10 Massa da matéria seca da raiz (g) em função das lâminas de irrigação dentro de cada proporção de silicato de cálcio

O Gráfico11 ilustra o comportamento da produção de matéria seca das raízes das plantas de milho frente ao incremento das proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação. Verifica-se que, embora o nível de produção de matéria seca de raiz varie dentro de cada lâmina de irrigação, praticamente, não se verifica resposta dessa produção frente ao aumento das proporções de silicato de cálcio. Exceção se verifica quando da aplicação de 160% da lâmina recomendada. Nesse tratamento, observa-se incremento significativo da produção de raiz com a elevação da proporção de silicato de cálcio até se atingir 50%. A partir de 50% verifica-se uma queda acentuada na produção de matéria seca de raiz.

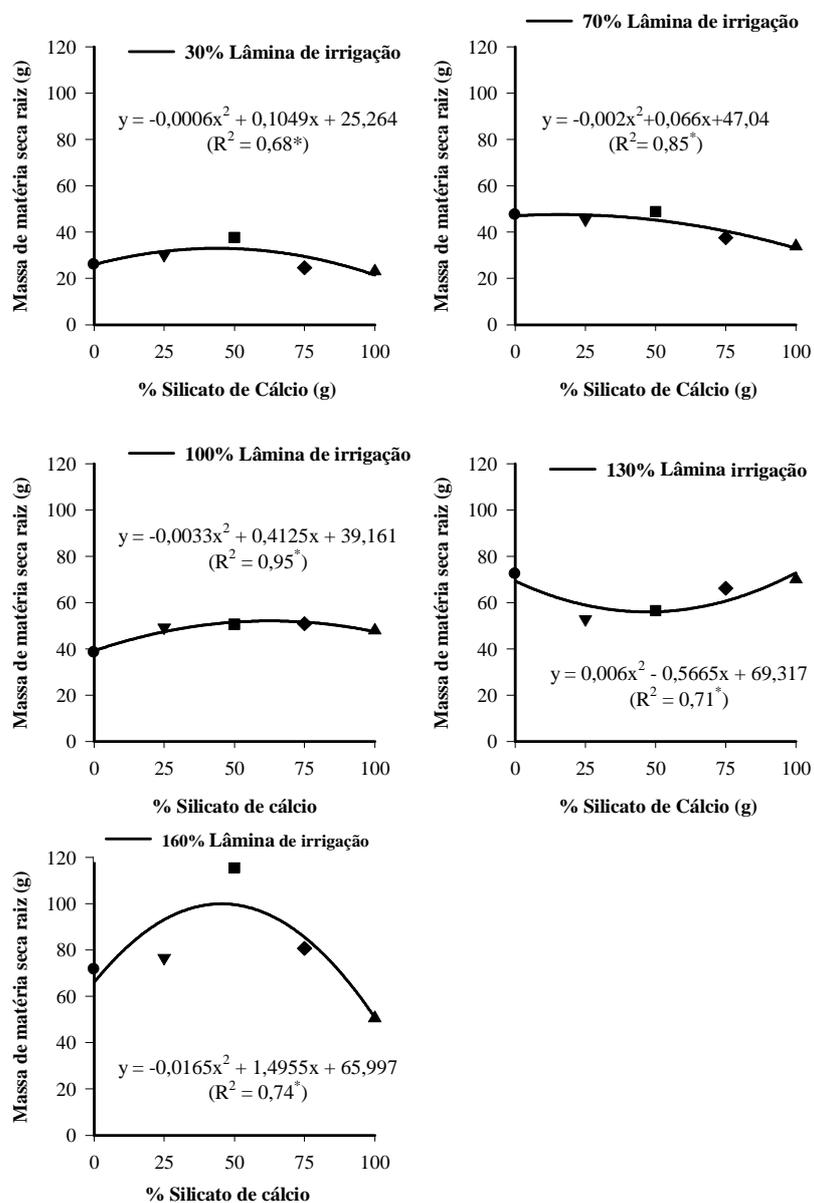


Gráfico11 Massa da matéria seca da raiz (g) em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação aplicada

4.5.5 Massa de matéria seca do colmo

Os Gráficos 12 e 13 mostram o comportamento da massa de matéria seca dos colmos das plantas de milho sob a influência da interação envolvendo as lâminas de irrigação e as proporções de silicato de cálcio. Verifica-se, no Gráfico 12, que a massa de matéria seca do colmo aumenta com o aumento da lâmina de irrigação, em todas as proporções de silicato. Observa-se na proporção de 100% de silicato de cálcio que a massa de matéria seca do colmo atinge seu valor máximo com a aplicação de 100% da lâmina recomendada. A partir daí, a massa de matéria seca decresce com o aumento da lâmina de irrigação.

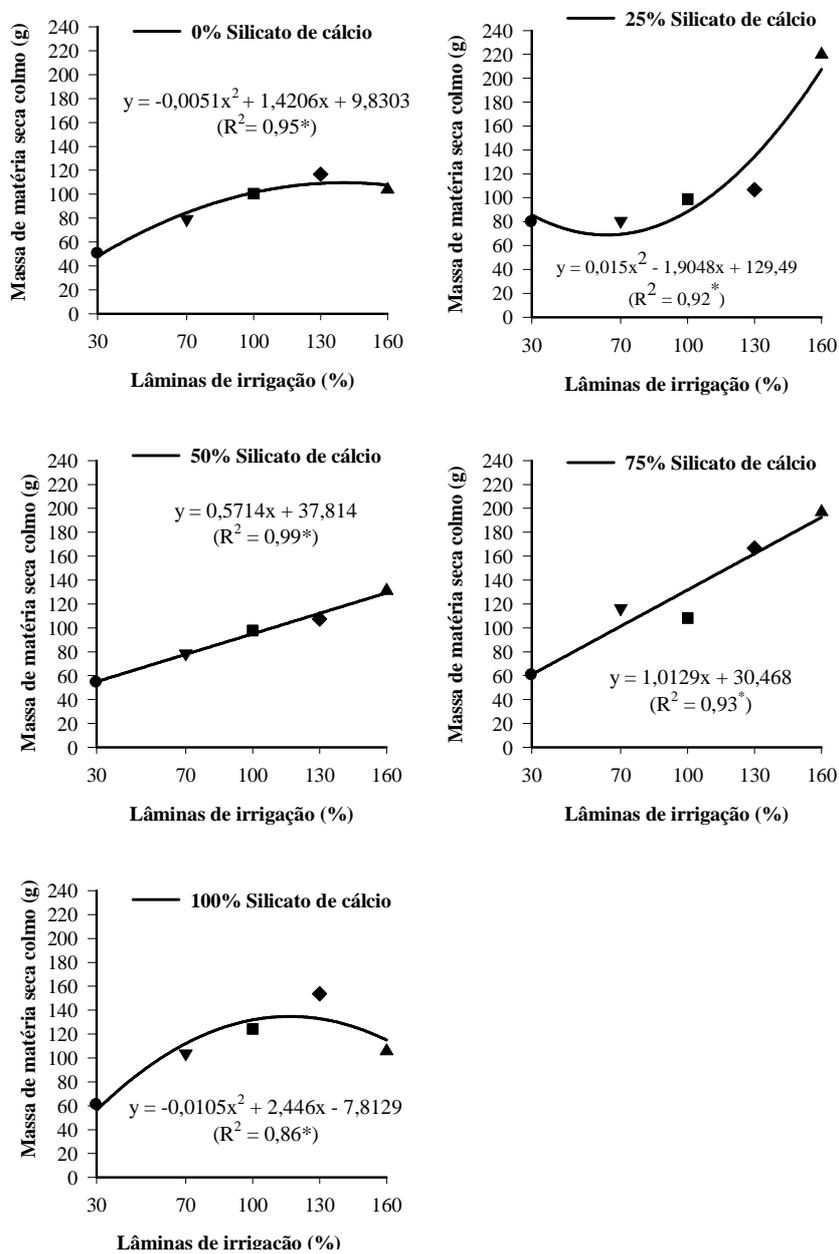


Gráfico 12 Massa de matéria seca do colmo (g) em função das diferentes lâminas de irrigação, dentro de cada proporção de silicato de cálcio

O Gráfico 13 ilustra a resposta da massa de matéria seca do colmo às diferentes proporções de silicato, dentro de cada lâmina de irrigação. Com a irrigação correspondente a 30% da lâmina recomendada, a massa de matéria seca do colmo não é influenciada pela proporção de silicato de cálcio. No entanto, para as aplicações de 70%, 100% e 130% lâmina de irrigação é possível observar tendência de aumento da massa de matéria seca do colmo com as proporções de silicato de cálcio. Estes resultados evidenciam o efeito benéfico do silício na produção de colmo do milho. Estes resultados concordam com Silveira Junior et al. (2003) que avaliaram o efeito da correção do solo usando calcário e silicato de cálcio e concluíram que a produção do colmo da cana-de-açúcar aumentou para o tratamento usando silicato de cálcio. Os mesmos autores, ainda, relatam que o acúmulo de silício em plantas como a cana-de-açúcar pode resultar na melhoria na estrutura da planta. A sílica não tem sido estudada intensivamente, em especial por não ser o Si considerado essencial às plantas, porém, em numerosos casos esse elemento demonstrou efeito benéfico no aumento de produção de diversas culturas (PEREIRA; VITTI; KORNDORFER, 2003). Para a aplicação de 160% lâmina de irrigação não foi possível observar tendência definida para a produção de colmo no milho em relação às proporções de silicato de cálcio.

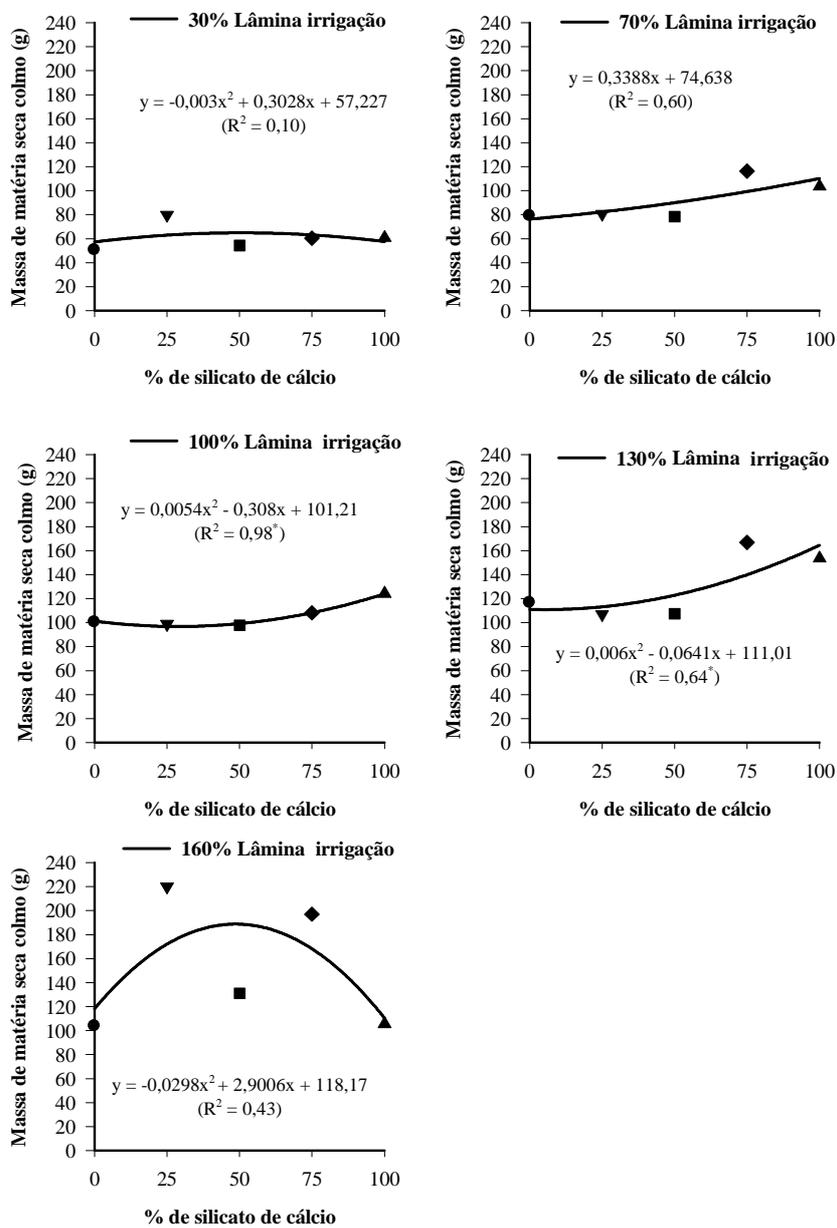


Gráfico 13 Massa de matéria seca do colmo (g) em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação

4.5.6 Massa de matéria seca das folhas

A produção de matéria seca das folhas das plantas de milho foi influenciada, significativamente, pela interação das lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio aplicadas ao solo. Os desdobramentos dessa interação estão representados nos Gráficos 14 e 15.

Observa pelo Gráfico 14 que, em todas as lâminas de irrigação, a produção de matéria seca das folhas aumenta em relação ao incremento das proporções de silicato de cálcio. Nota-se, com uma tendência geral, que a associação de 50% silicato de cálcio e 50% de carbonato de cálcio, é a combinação que resulta na melhor resposta das plantas. Mesmo não sendo considerado um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o silício tem sido associado a diversos efeitos benéficos, dentre os quais se destacam: o baixo coeficiente de transpiração, com melhor aproveitamento da água; o maior teor de clorofila e a maior rigidez estrutural dos tecidos, com o aumento da resistência mecânica das células, deixando as folhas mais eretas e aumentando a área fotossintética e a absorção de CO₂. Somam-se a isto, a redução do acamamento; o aumento do número de folhas e da matéria seca; o retardo da senescência e a proteção contra estresses bióticos, por meio da diminuição da incidência de patógenos e do aumento da resistência a insetos pela formação de uma barreira mecânica. Também está envolvido na tolerância a estresses abióticos, como o salino, tornando as células mais tolerantes (EPSTEIN, 1975). Esses fatores fizeram com que, no Brasil, o silício passasse a fazer parte da lista de micronutrientes, embora as pesquisas ainda não tenham demonstrado a essencialidade deste elemento (OLIVEIRA, 2009).

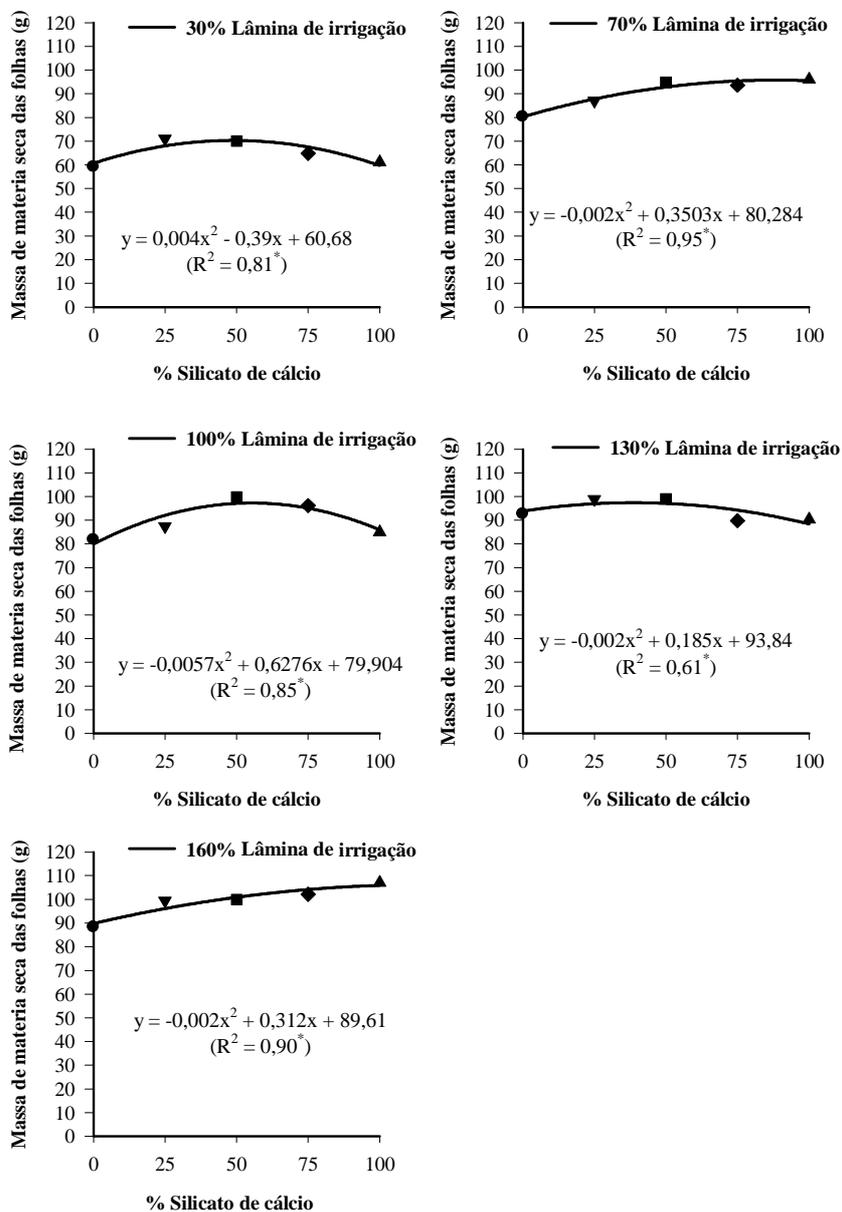


Gráfico 14 Massa da matéria seca das folhas (g) em função das proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação

O Gráfico 15 ilustra o comportamento da produção de matéria seca das folhas, em função do aumento das lâminas de irrigação, dentro de cada proporção de silicato de cálcio. Verifica-se que, independentemente da proporção de silicato de cálcio, a massa de matéria seca das folhas aumenta à medida que se eleva a quantidade de água aplicada nas diferentes lâminas de irrigação. O comportamento da produção de massa de matéria seca, quanto às lâminas de irrigação, em todas as proporções de silicato e cálcio, é descrito por funções quadráticas. Observa-se que a massa de matéria seca das folhas atinge valores máximos com aplicação de 130% da lâmina recomendada, com tendência de queda a partir desse valor. De acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), o estresse hídrico reduz a produção de matéria seca das folhas e o rendimento da cultura, esta redução depende das proporções com que o estresse tenha afetado as áreas de atividade fotossintética pelo déficit imposto, e sobre a taxa e o grau de recuperação depois de cessado o estresse. Considerando as condições de estresse hídrico condicionadas pelas lâminas de 30 e 70%, observa-se que as proporções de 50, 75 e 100% silicato de cálcio são aquelas nas quais ocorrem as maiores produções de matéria seca das folhas. Estes dados são importantes, pois ressaltam o benefício do silício como amenizador do estresse hídrico na cultura do milho. A utilização da associação silicato-calcário, notadamente na proporção 50%, evidencia a complementariedade desses corretivos, pelo fato do silicato de cálcio ter um poder de neutralização menor que o calcário que tem maior solubilidade.

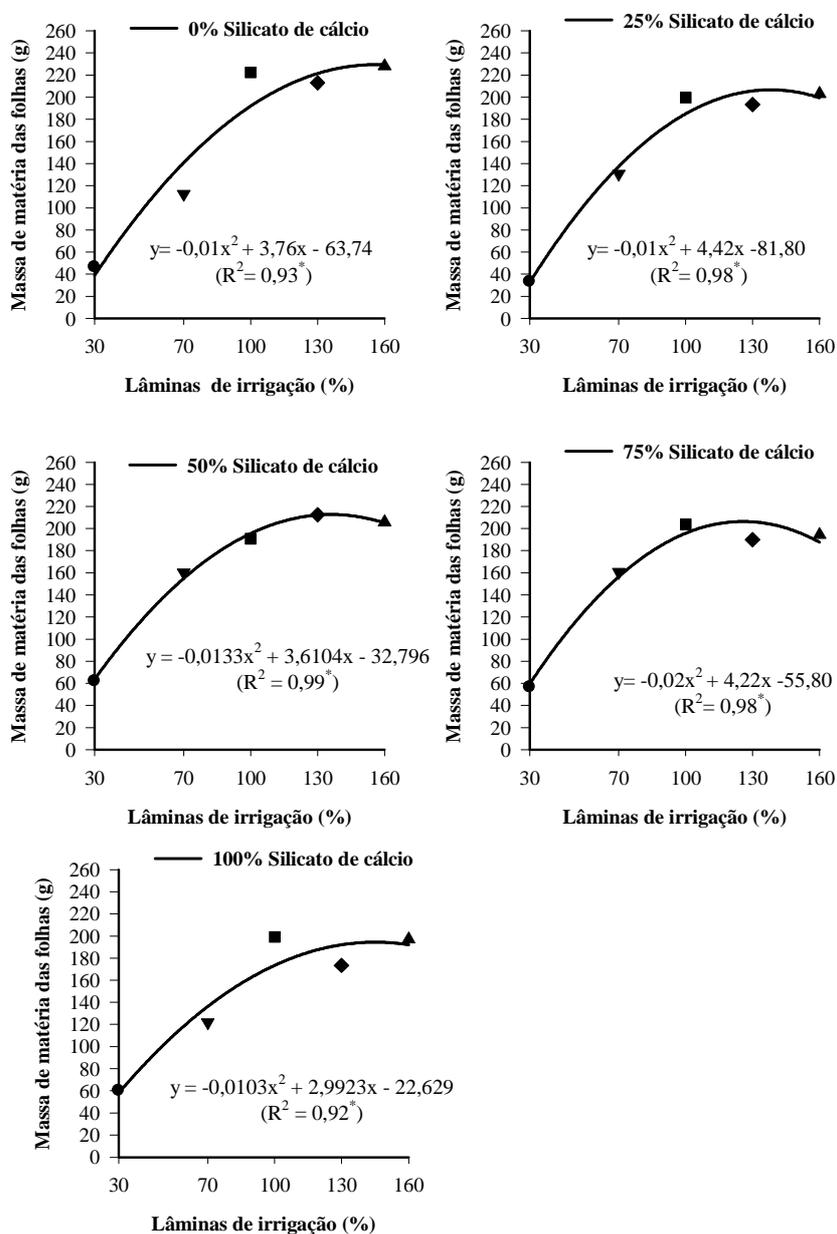


Gráfico 15 Massa da matéria seca das folhas (g) em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio

4.5.7 Massa de matéria seca do sabugo

A análise de variância dos dados relativos à massa de matéria seca do sabugo apontou efeito significativo da interação, envolvendo lâminas de irrigação e proporção de silicato de cálcio. Os desdobramentos dessa interação estão representados nos Gráficos 16 e 17.

No Gráfico 16 está apresentado o comportamento da massa de matéria seca do sabugo, frente ao aumento das lâminas de irrigação, dentro de cada proporção de silicato de cálcio. Como tendência geral, observa-se que a massa de matéria seca do sabugo aumenta à medida que se eleva a quantidade de água aplicada. Na ausência de silicato de cálcio, a massa de matéria seca do sabugo se mostrou, continuamente, dependente da lâmina de irrigação. Na presença de silicato de cálcio, a massa de matéria seca do sabugo respondeu positivamente ao incremento da irrigação até a aplicação de 100% da lâmina recomendada, após o que verifica-se um declínio desse atributo. A diminuição na produção de matéria seca do sabugo pode ser relacionada ao efeito do excesso de água nas raízes sobre o metabolismo do milho. O alagamento pode levar à redução da disponibilidade de oxigênio do solo onde a planta cresce. Nessas condições, fica impossível manter o metabolismo aeróbio e a produção de energia suficiente para que a planta cresça adequadamente. Essa redução no crescimento da planta está relacionada aos seguintes fatores: diminuição da produção de ATP, resultante do metabolismo anaeróbio; fechamento estomático, com redução na captação de CO₂; menor fotossíntese (KOZLOWSKI, 1984).

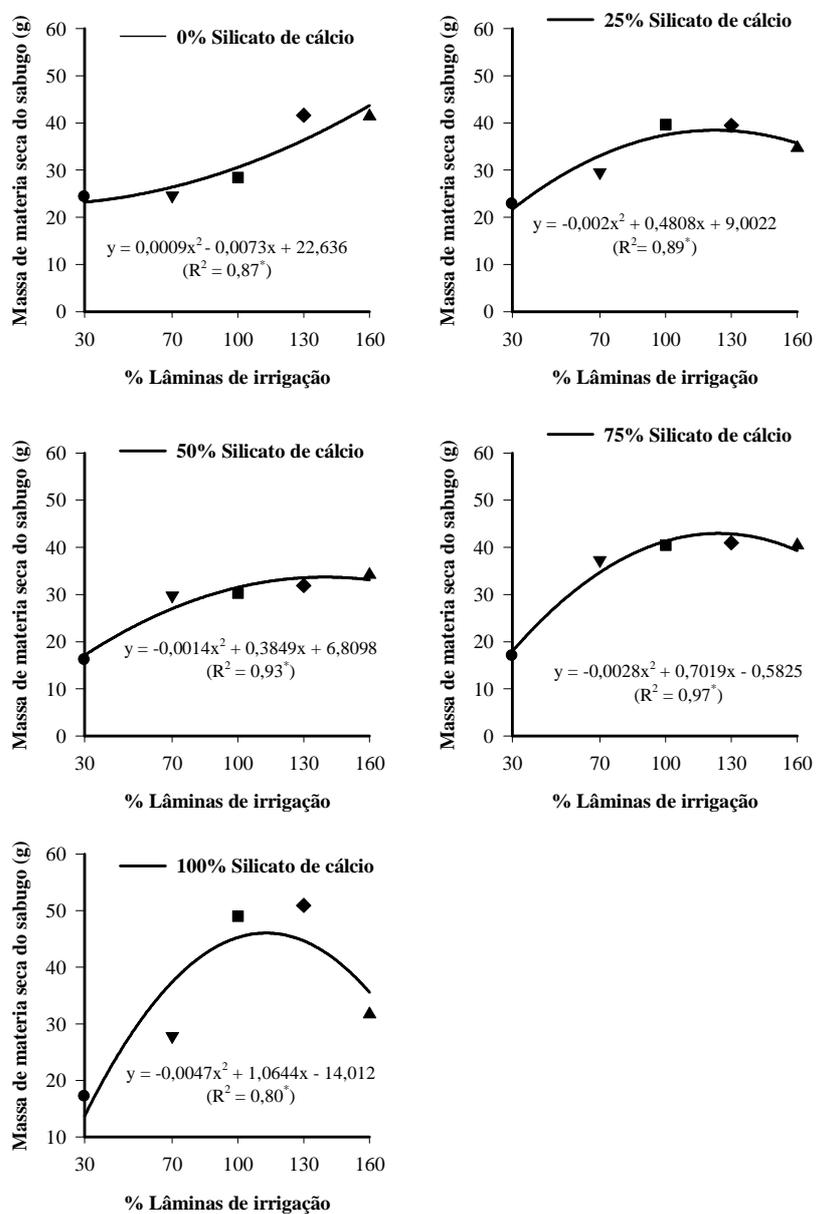


Gráfico 16 Massa de matéria seca do sabugo (g) em função das lâminas de irrigação dentro de cada proporção de silicato de cálcio

Para as aplicações de 30, 70, 100, 130% lâminas de irrigação observou-se que a produção do sabugo aumentou com o incremento das diferentes proporções de silicato de cálcio (Gráfico 17). O silício promove resistência a condições de estresse, porque ajuda a garantir a integridade da membrana celular (ZUCCARINI, 2008). O efeito da proteção mecânica é atribuído, principalmente, ao depósito de silício, na forma de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), na parede celular. A acumulação de silício nos estomas provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual, pela redução da transpiração, faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor. Isso pode ser de extrema importância para as plantas que crescem em solos de clima tropical, onde estão sujeitas a veranicos (DATNOF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001).

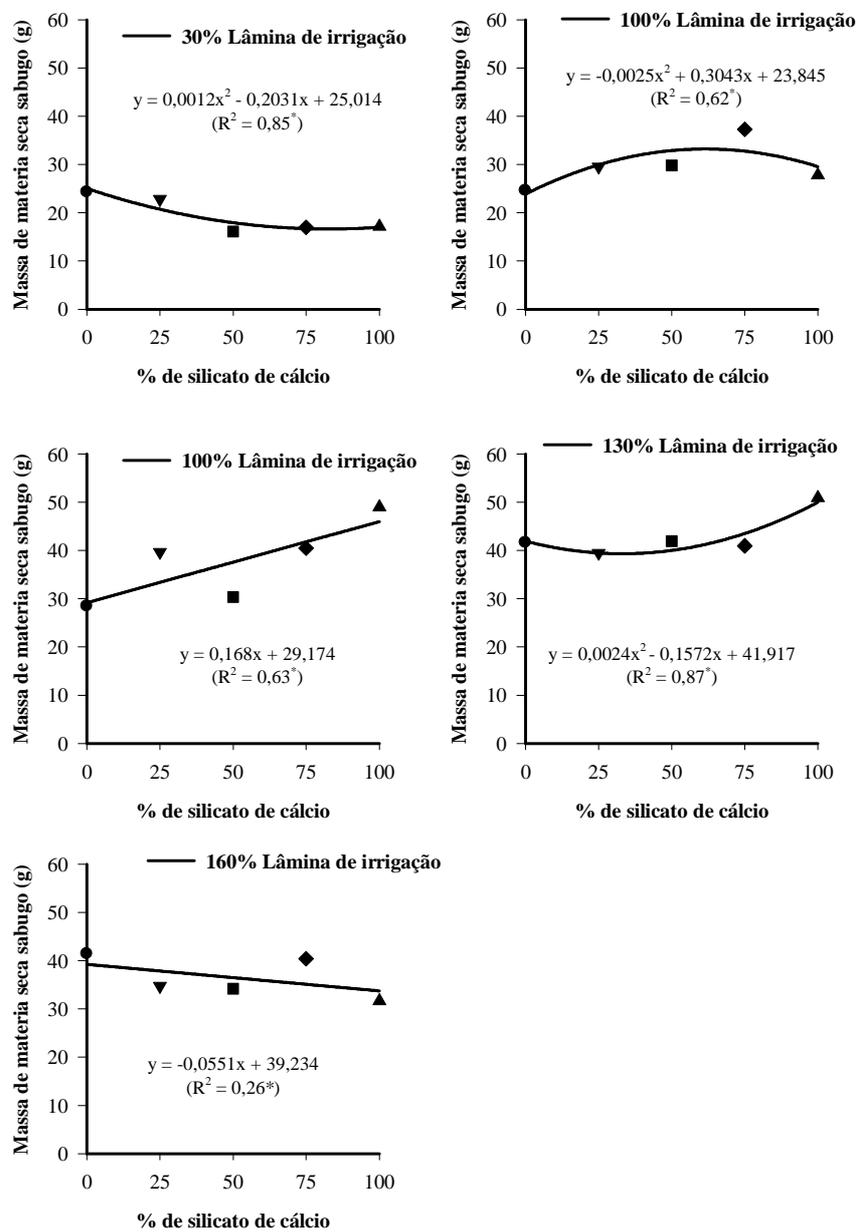


Gráfico 17 Massa de matéria seca do sabugo (g) em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

4.6 Componentes da produção

4.6.1 Número de fileira de grãos na espiga

No Gráfico 18 apresenta-se a resposta do número de fileiras de grãos na espiga ao aumento das proporções de silicato de cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. Observa-se que apenas nas aplicações de 30 e 70% lâmina de irrigação o número de fileiras de grãos na espiga respondeu, positivamente, ao aumento das proporções de silicato de cálcio. Já para as maiores aplicações, 100, 130 e 160% lâmina de irrigação, a produção de fileiras de grãos na espiga manteve-se, praticamente, constante à medida que se elevaram as proporções de silicato de cálcio. O número de fileiras de grãos é um importante indicador da formação da espiga que, em última análise, concorre para uma maior produção. Esses resultados refletem mais uma vez o efeito do silício como amenizador do estresse hídrico, pois, acredita-se que o mesmo possa estar envolvido em atividades metabólicas ou fisiológicas das plantas nessas condições. Gunes et al. (2008), trabalhando com gramíneas, verificaram que a aplicação de silício levou ao acúmulo dos níveis de enzimas antioxidantes, fotossíntese e produção.

O número de fileiras de grãos na espiga apresentou resposta quadrática ao incremento das lâminas de irrigação em todas as proporções de silicato de cálcio (Gráfico 19). Nas proporções de 25, 50, 75 e 100 % de silicato de cálcio, o número de fileiras de grãos na espiga se eleva com a irrigação, até se atingir 100% lâmina recomendada. Após essa condição, houve uma tendência de queda na produção de fileira de grãos. Apenas para a proporção de 0% silicato de cálcio não fica evidente a estabilização do o aumento do número de fileiras de grãos na espiga com a elevação da lâmina de irrigação. Conforme comentado anteriormente, este aumento no número de fileiras é muito importante para o aumento da produtividade do milho. O maior número de fileira contribui para

aumentar a produção de milho em situações de estresse hídrico. Os dados encontrados para esta variável corroboram com outros encontrados na literatura, que descrevem o efeito amenizador do silicato de cálcio para condições de estresse seja ele biótico ou abiótico (MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001) ou especificamente hídrico (PULZ et al., 2008).

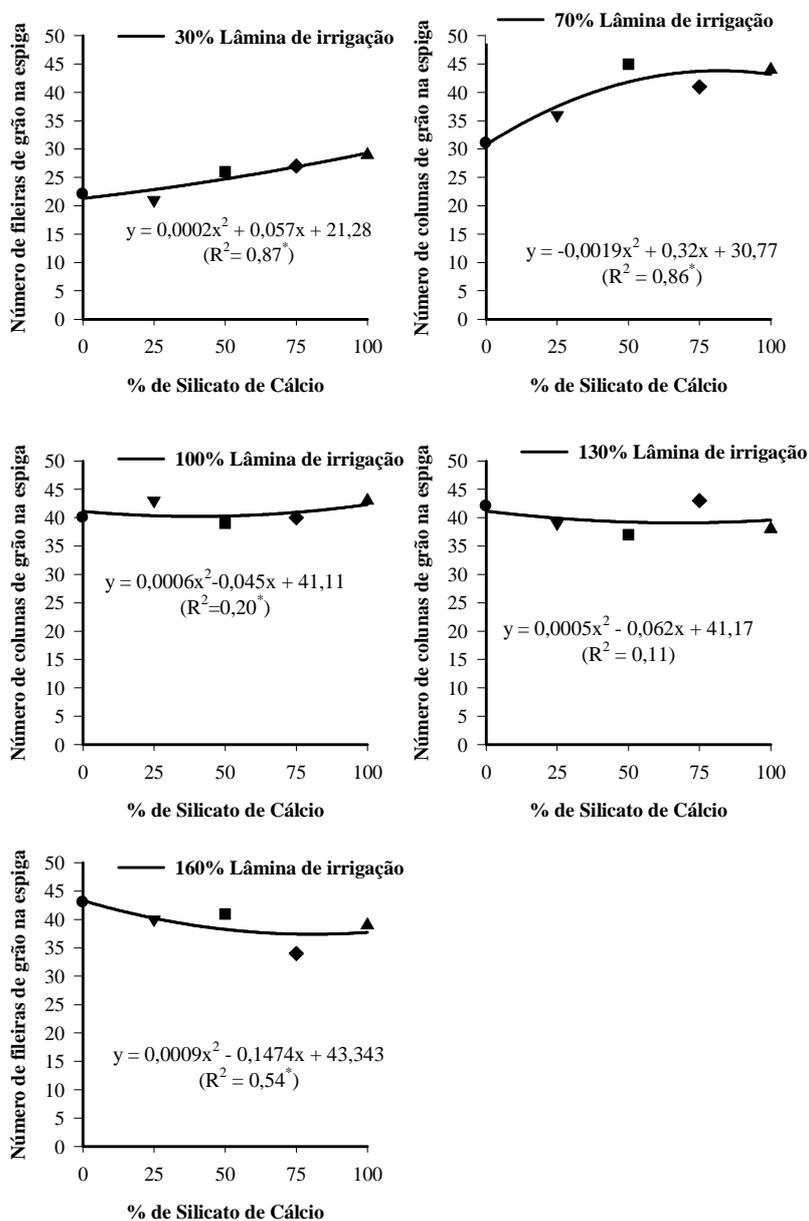


Gráfico 18 Número de fileiras de grão na espiga em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

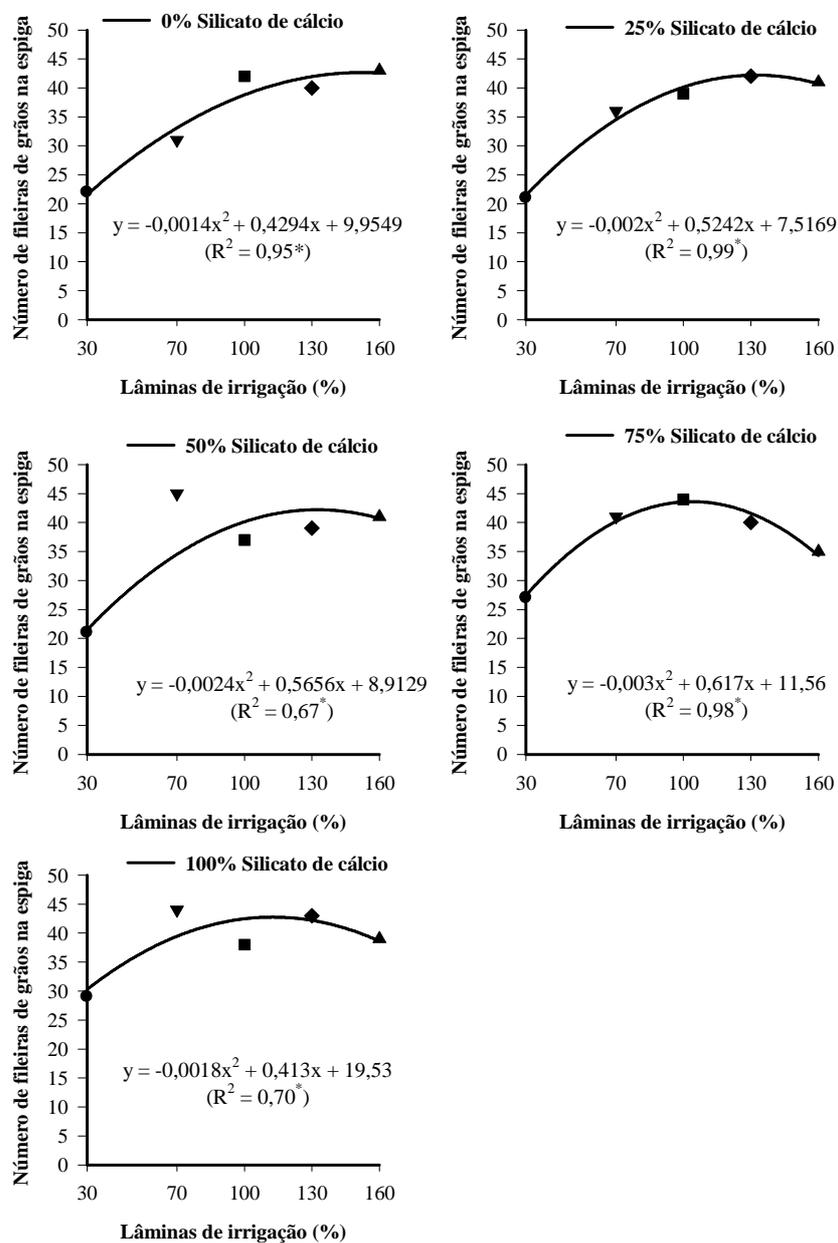


Gráfico 19 Número de fileiras de grãos na espiga em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio

4.6.2 Número de colunas de grãos na espiga

Os Gráficos 20 e 21 descrevem o comportamento no número de colunas de grãos na espiga, respectivamente, em função das diferentes proporções de silicato de cálcio e em função das diversas lâminas de irrigação.

O Gráfico 20 ilustra a resposta da produção de colunas de grãos na espiga de milho, em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. Observa-se, em cada uma das diferentes lâminas de irrigação, aumento do número de colunas de grãos à medida que se eleva a proporção de silicato de cálcio, ficando evidente o efeito benéfico do silício na formação da espiga. Dentro desse contexto, a utilização do silício se constitui numa estratégia para se aumentar a produtividade e tentar produzir espigas melhor formadas, ou seja, sem falhas de grãos.

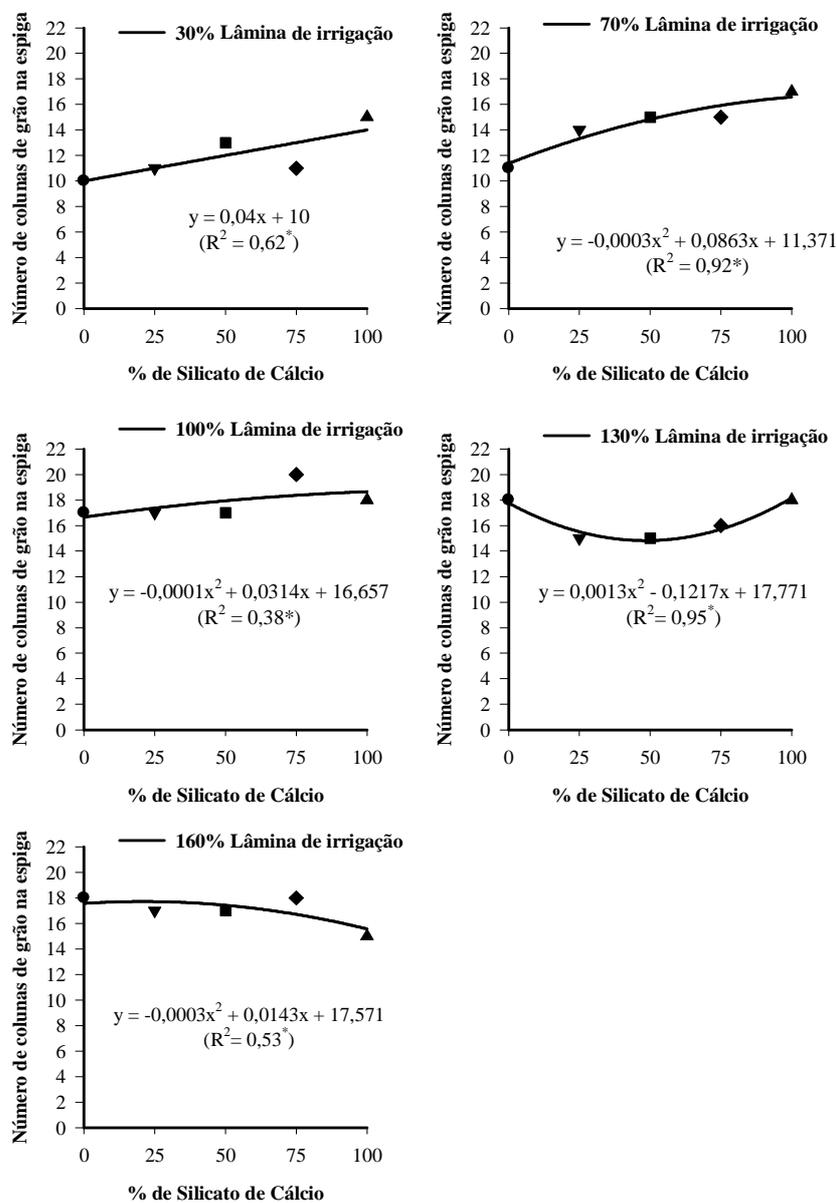


Gráfico 20 Número de colunas de grãos na espiga em função da proporção de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

Analisando-se a produção de colunas de grãos na espiga, em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio (Gráfico 21), observa-se resposta quadrática dessa variável frente à elevação da quantidade de água aplicada. Nota-se que a irrigação correspondente à aplicação de 100% lâmina recomendada se constitui no tratamento limítrofe entre o aumento e a queda no número de colunas de grãos, com a elevação da quantidade de água aplicada. Para esta variável apresenta importantes resultados, quando analisamos individualmente 0% silicato de cálcio, quando comparado com o tratamento de 100% silicato de cálcio; para estas duas proporções nota-se aumento na produção de colunas de grãos na espiga para o tratamento com 100% silicato de cálcio em relação aos efeitos mais severos proporcionados pelas menores lâminas de irrigação. No entanto, para o tratamento usando a proporção de 100% silicato de cálcio, quando aplicado 100% lâmina de irrigação, que é a recomendada para o milho, ocorre ganho no número de colunas de grãos. E o aumento nas aplicações das lâminas de irrigação diminui a produção de colunas de grãos. Esta queda está relacionada ao efeito adverso do excesso de água que acarretou na criação de um ambiente anaeróbico nas raízes, com isso diminui o metabolismo da planta. O número de grãos por espiga não foi alterado, significativamente, em função da aplicação de doses de Si, via foliar, em diferentes épocas (FREITAS et al., 2011). Quando o déficit hídrico ocorre, durante o período crítico da cultura, a produtividade de grãos é afetada, reduzindo, principalmente, o número de grãos por espiga (MATZENAUER, 1994; BERGONCI et al., 2001). Nessas condições, o uso da irrigação torna-se fundamental, pois é no período crítico que ocorrem os maiores efeitos do déficit hídrico e, também, a maior eficiência do uso da irrigação, tanto na produção de matéria seca quanto na produtividade de grãos.

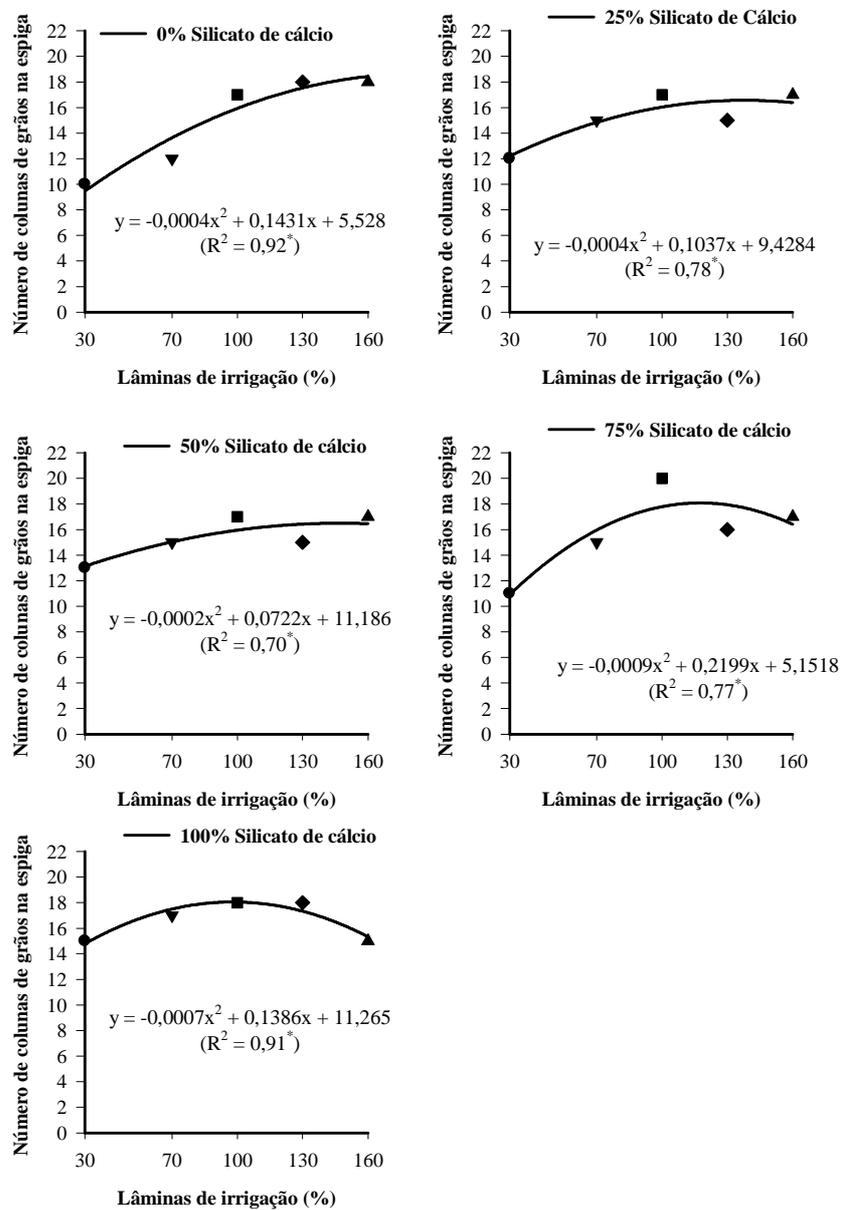


Gráfico 21 Número de colunas de grãos na espiga em função das lâminas de irrigação, nas diferentes proporções de silicato de cálcio

4.6.3 Comprimento da espiga

O Gráfico 22 ilustra o comportamento do comprimento da espiga frente à variação da lâmina de irrigação, nas distintas proporções de silicato de cálcio. Observa-se que, independentemente da proporção de silicato de cálcio, o comprimento da espiga tende a aumentar com o aumento da lâmina de irrigação. Essa influência se mostra mais pronunciada na presença de silicato de O, tratamento com 100% lâmina de irrigação representa o volume recomendado para a cultura do milho e neste ponto é possível definir tendência de aumento ou queda no comprimento da espiga em relação às diferentes proporções de silicato em relação. Com a adição de silício ao solo, combinado com o calcário, proporcionou melhor desenvolvimento das plantas de milho. Para fins de economia de água 50% de silicato de cálcio e associação mais vantajosa. Os dados referentes ao comprimento da espiga estão de acordo com a característica da cultivar BR 106 (EMBRAPA, 2013).

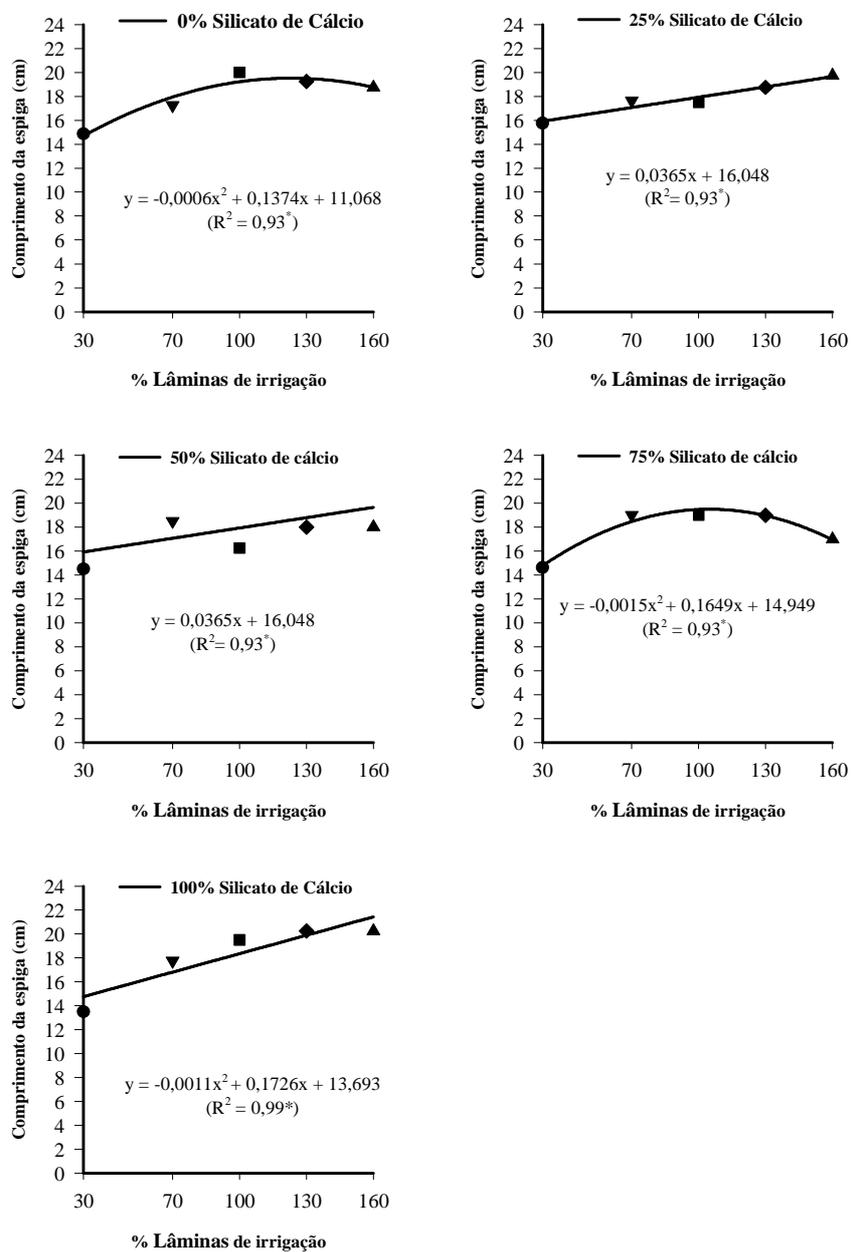


Gráfico 22 Comprimento da espiga (cm) em função das diferentes lâminas de irrigação, nas diversas proporções de silicato de cálcio

O Gráfico 23 apresenta o comprimento da espiga, em função das proporções de silicato de cálcio, em cada uma das diferentes lâminas de irrigação. Para as 30% lâmina de irrigação notou-se tendência de queda no comprimento da espiga em função do aumento da proporção de silicato de cálcio. Entretanto, apesar do comprimento da espiga ter sido superior para a proporção de 0% de silicato de cálcio, observou-se que não houve formação completa dos grãos na espiga, quando comparado com a proporção de 100% de silicato de cálcio que apresentou maior produção de grãos. Já para 70, 100, 130 e 160% da lâmina de irrigação houve uma tendência de aumento no comprimento da espiga em função da proporção de silicato de cálcio. Estes resultados evidenciam efeito benéfico do silício notando que, com o incremento do elemento em diferentes proporções, ocorre benefício para o comprimento da espiga.

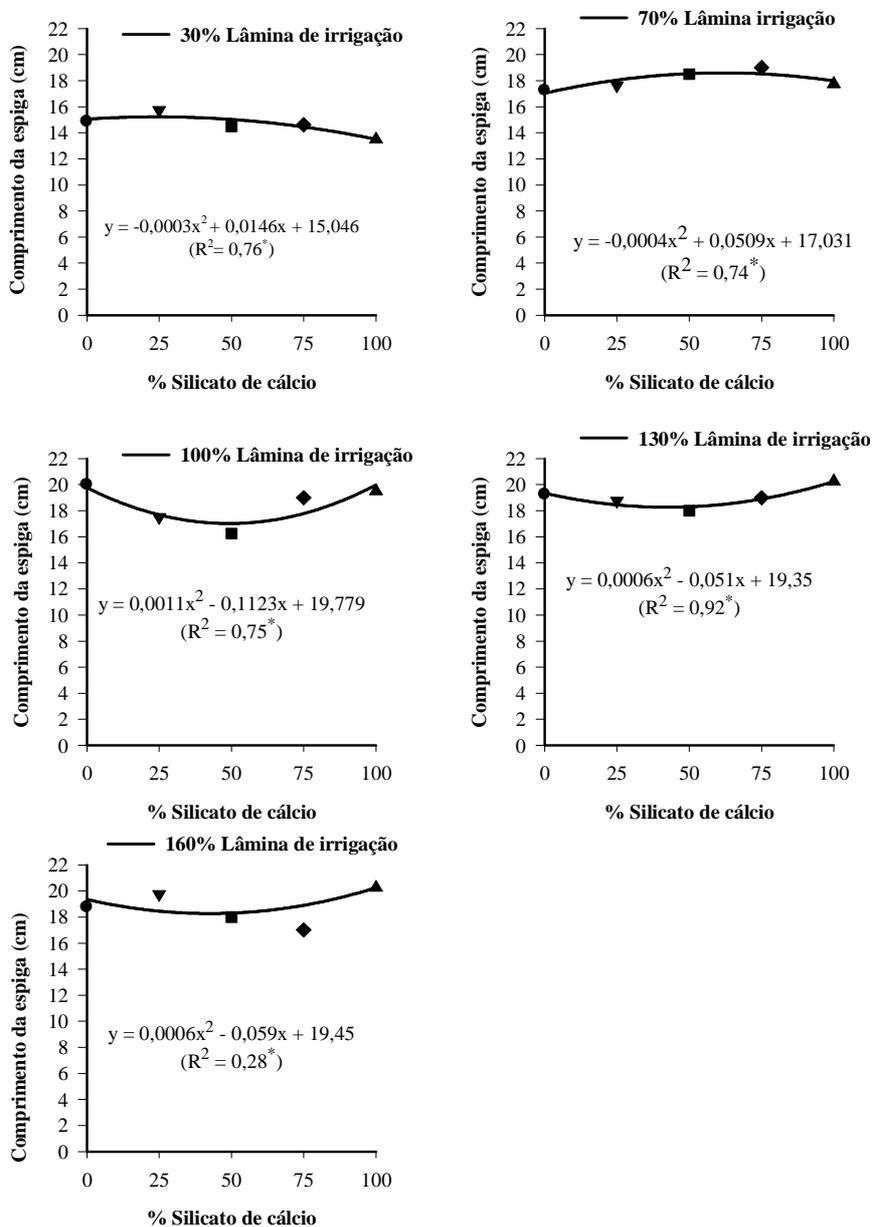


Gráfico 23 Comprimento da espiga (cm) em relação às diferentes proporções de silicato de cálcio em relação às diversas % da lâmina de irrigação

4.6.4 Massa de 100 grãos de milho

No Gráfico 24 estão os resultados encontrados para a massa de 100 grãos de milho, em função da elevação da lâmina de irrigação, nas diversas proporções de silicato de cálcio. Deve-se registrar aqui que a interação lâmina de irrigação x proporção de silicato de cálcio não influenciou, significativamente, a massa de 100 grãos. Observa-se, no Gráfico 24, que a massa de 100 grãos responde positivamente ao incremento da lâmina de irrigação em todas as proporções de silicato de cálcio. Verifica-se que a cultura do milho responde muito bem ao aumento da lâmina de irrigação para o aumento na produção. Estes resultados concordam com Freitas et al. (2011) que encontraram que a massa de 100 grãos não foi influenciada pela aplicação doses de Si, via foliar, na cultura do milho em diferentes épocas.

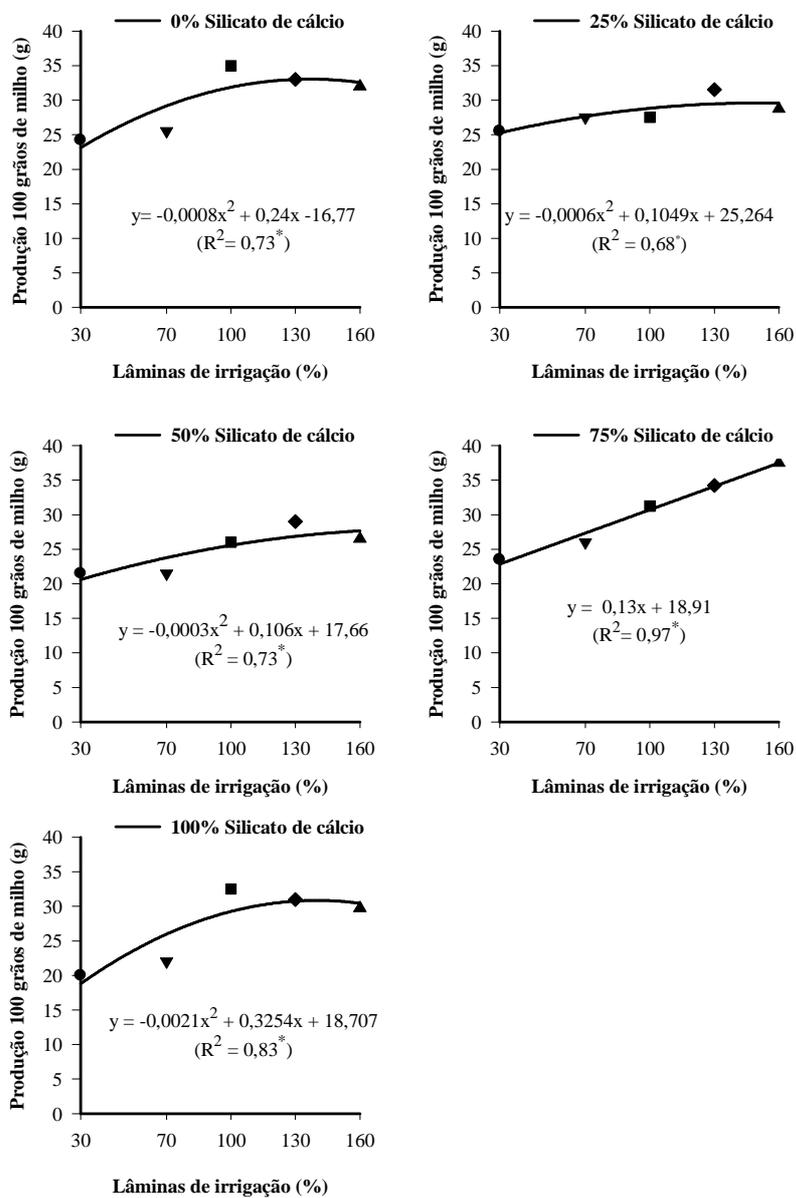


Gráfico 24 Produção de 100 grãos de milho (g) em função da proporção de silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação

4.6.5 Produção de grãos

O Gráfico 25 compara a produção de grãos de milho entre as diferentes proporções de silicato de cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. Observa-se como tendência geral que ocorre um aumento da produção à medida que se elevam as diferentes das lâminas de irrigação. Para a lâmina de 30% de irrigação, nota-se que as maiores produções ocorrem para as proporções de 50, 75 e 100% de silicato de cálcio. Já para a 70% lâmina de irrigação, a maior produção de grãos foi para as proporções de 50 e 75% de silicato de cálcio. Estes resultados indicam que o silício amenizou o estresse hídrico em plantas de milho conduzidas sob estresse hídrico. Para as aplicações de 100, 130 e 160% lâminas de irrigação não se observam diferenças estatísticas para a produção de milho nas diferentes proporções de silicato de cálcio. Em arroz, observou-se que houve aumento na produção de grãos com a aplicação de silicato de cálcio, particularmente, quando as plantas foram submetidas às menores quantidades de água disponível no solo. Assim, quanto menor o valor da capacidade de campo do solo, maior foi a resposta das plantas ao silício (FARIA, 2000). O composto de silício, presente na fase líquida do solo, na faixa de pH entre 4 e 9, é o monômero H_4SiO_4 (MARSCHNER, 1995), o qual é absorvido pelas raízes das plantas na forma passiva ou ativa por transportadores de membrana específicos para este fim. Muitos estudos têm sido desenvolvidos visando a uma adaptação melhor das culturas a regiões com limitações hídricas e mais tolerantes à acidez (RAIJ et al., 1998). No entanto, o rendimento das espécies sob estresse, está bem aquém dos seus potenciais de produtividade, dentre as quais se encontra o milho, caracteristicamente, pouco tolerante ao déficit hídrico (SILVA; NOVAIS; SEDIYAMA, 1984) e cujo cultivo em regiões semi-áridas, como o Nordeste brasileiro, é de suma importância não só para suprir diretamente as necessidades alimentares da população, mas também da agroindústria regional. A absorção do

Si confere benefícios às culturas, tais como: aumento da resistência ao acamamento e da eficiência fotossintética. O silício é um elemento químico envolvido em funções físicas de regulação da evapotranspiração e é capaz de formar uma barreira de resistência mecânica à invasão de fungos e bactérias para o interior da planta, dificultando, também, o ataque de insetos praga (COSTA; MORAES, 2009). O efeito da proteção mecânica é atribuído, principalmente, ao depósito de silício, na forma de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), na parede celular. A acumulação de silício nos estomas provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual, pela redução da transpiração (DATNOF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001), faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor. Isso pode ser de extrema importância para as plantas que crescem em solos de clima tropical, onde estão sujeitas a veranicos. A fotossíntese desempenha importante papel na produção de uma cultura (WULLSCHLEGER; OOSTERHUIS, 1990), pois o rendimento de grãos é, potencialmente, influenciado pela duração da taxa de acumulação de carboidratos (CRAFTS-BRANDNER; PONELEIT, 1992). De acordo com Jordan (1983), o déficit hídrico pode afetar a utilização de carboidratos, por alterar, basicamente, a eficiência com que os fotoassimilados são convertidos para o desenvolvimento de partes novas na planta. O déficit hídrico ocasiona mudanças na partição dos carboidratos no interior da planta, condicionando as plantas desenvolverem mecanismos de adaptação e resistência.

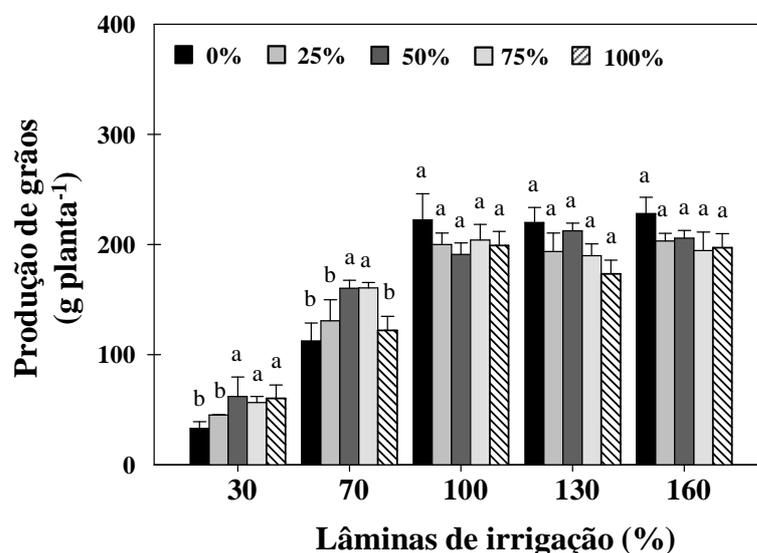


Gráfico 25 Produção de grãos de milho (g planta^{-1}) em função de proporções de silicato de cálcio em diferentes lâminas de irrigação

4.7 Avaliação nutricional das plantas

Na avaliação do estado nutricional das plantas de milho verificou-se que as concentrações de macro e micronutriente nos diferentes órgãos da planta (colmo, folha, palha da espiga, sabugo e grão) foram influenciadas, significativamente, pela interação envolvendo as proporções de silicato de cálcio e as lâminas de irrigação.

4.7.1 Concentrações de macro e micronutrientes no colmo

O Gráfico 26 apresenta as concentrações de N, P, K, Ca, Mg e S no colmo do milho, em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. Observa-se que, para todos os nutrientes analisados, ocorre redução da concentração com o aumento das diferentes

lâminas de irrigação, independentemente, das proporções de silicato de cálcio. Esse resultado está relacionado com o chamado efeito diluição, ou seja, conforme discutido anteriormente, a massa de matéria seca do colmo aumenta com o aumento da lâmina de irrigação, o que por via de consequência, concorre para a redução da concentração do nutriente. Para o N, observa-se que, nas lâminas de 30 e 70%, as maiores concentrações se verificam, respectivamente, nas proporções de 50 e 25% de silicato de cálcio, enquanto que a menor concentração de N é observada quando da utilização de 75% de silicato de cálcio. Na lâmina de irrigação de 100%, as concentrações de N no colmo decrescem na mesma razão em aumenta a proporção de silicato de cálcio. Já para as lâminas de 130 e 160%, a tendência é inversa em relação à lâmina de 100%, ou seja, as concentrações de N aumentam na medida em que se elevam as proporções de silicato de cálcio. Com relação às concentrações de P no colmo do milho, observa-se que, com exceção da lâmina de irrigação de 100%, em todas as lâminas de irrigação, as maiores concentrações desse elemento são encontradas quando da utilização da proporção de 25% de silicato de cálcio. Na lâmina de 100%, a menor concentração de P no colmo ocorre exatamente na proporção de 25% de silicato de cálcio. Embora tenha sido verificado (Tabela 3) que o aumento das proporções de silicato de cálcio incrementou os teores de P e o Prem no solo até a 50% silicato de cálcio, tal incremento não trouxe reflexo positivo para o acúmulo desse elemento no colmo do milho. Prado e Fernandez (2001) estudaram o P disponível em um Latossolo Vermelho-Amarelo, comparando um calcário calcítico e a escória de siderurgia, utilizados para elevar a saturação de bases a 50%, 75% e 100% desse solo. Observaram que houve um efeito linear da escória no aumento do P disponível no solo. Pode-se afirmar como tendência geral que, independentemente da lâmina de irrigação empregada, as concentrações dos demais macronutrientes (K, Ca, Mg e S) no

colmo decrescem na medida em que se elevam as proporções de silicato de cálcio.

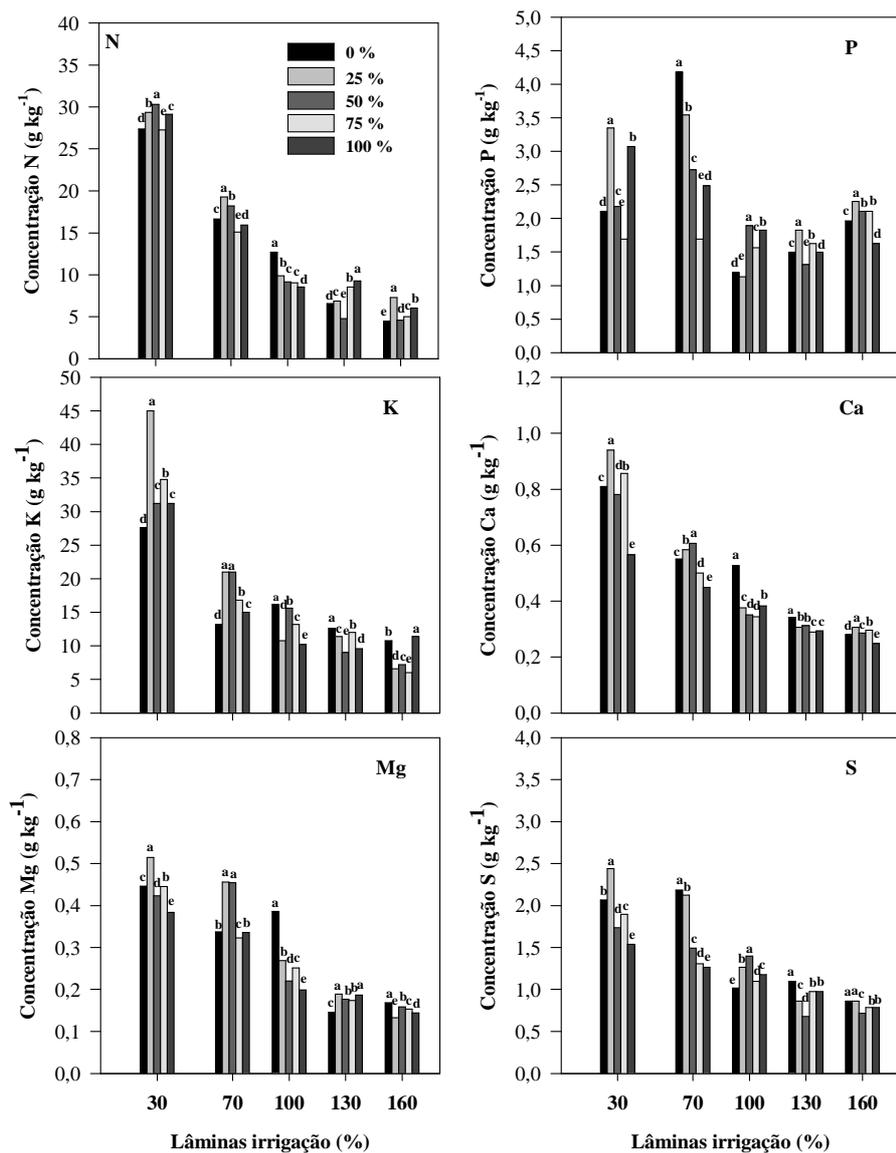


Gráfico 26 Concentrações de macronutrientes no colmo do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

O Gráfico 27 apresenta os resultados das avaliações das concentrações dos micronutrientes B, Zn, Mn, Fe e Cu no colmo do milho, em função das proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação. Do mesmo como aconteceu para macronutrientes, observa-se que as concentrações dos micronutrientes no colmo decrescem à medida que se elevam as lâminas de irrigação. É possível identificar duas tendências distintas para as concentrações dos micronutrientes no colmo do milho, em relação às proporções de silicato de cálcio, independentemente da lâmina de irrigação. Em todas as lâminas de irrigação, as concentrações de B e Fe no colmo tendem a acompanhar o aumento das proporções de silicato de cálcio no corretivo, ou seja, as maiores concentrações desses micronutrientes são observadas nos tratamentos relativos às maiores proporções de silicato de cálcio e, conseqüentemente, as menores estão associadas às menores proporções de silicato. No caso do Fe, as maiores concentrações estão associadas às proporções de 50 e 25% de silicato de cálcio, enquanto que as menores ocorrem, invariavelmente, na ausência de silicato de cálcio. Para o Zn e o Cu essa tendência é inversa. As concentrações desses micronutrientes decrescem na medida em que se elevam as proporções de silicato de cálcio. Não é possível identificar qualquer tendência para as concentrações de Mn no colmo do milho.

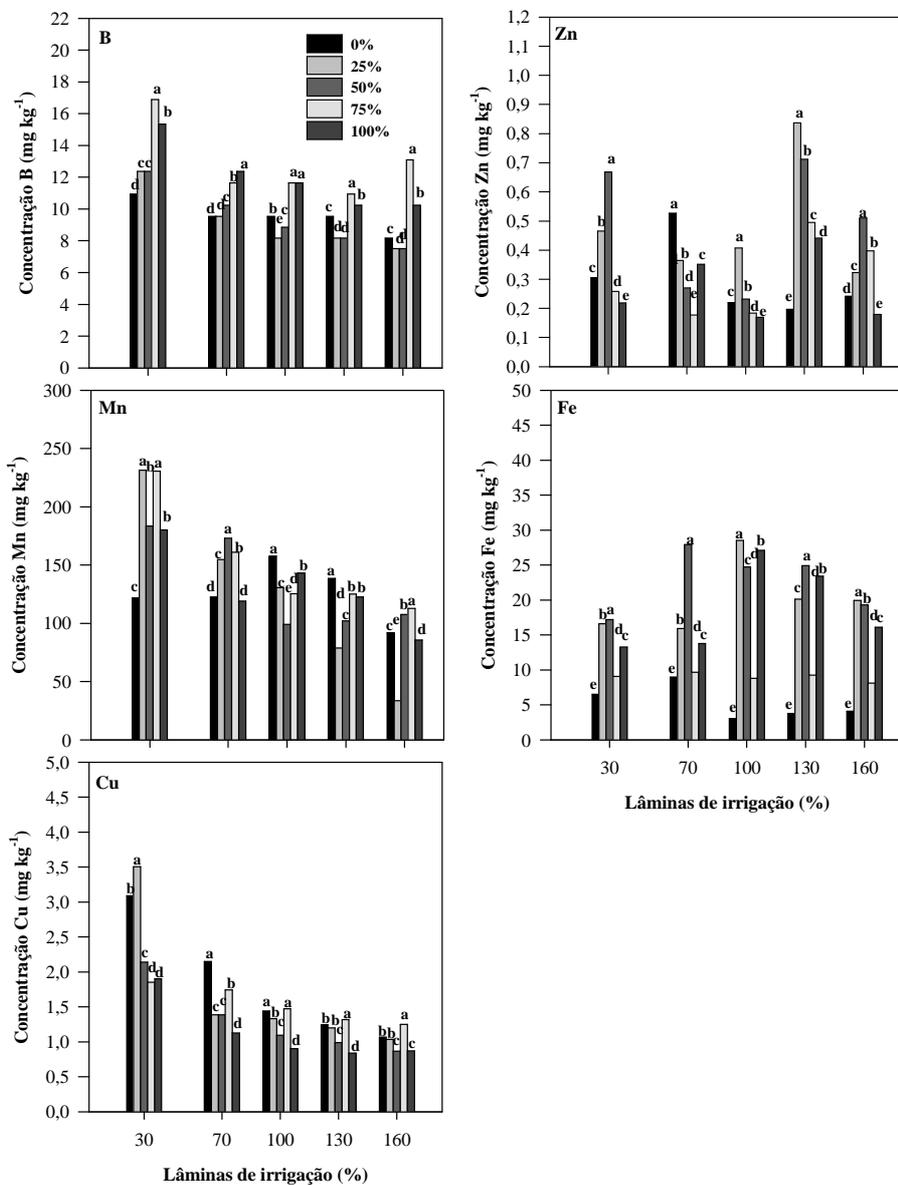


Gráfico 27 Concentrações de micronutrientes no colmo do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

4.7.2 Concentrações de macro e micronutriente na folha

O Gráfico 28 apresenta as concentrações de N, P, K, Ca, Mg e S nas folhas do milho, em função das proporções de silicato de cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. Inicialmente observa-se que as concentrações de N e S, nas várias proporções de silicato de cálcio, tendem a diminuir com a elevação da lâmina de irrigação. O mesmo não se verifica para as concentrações de P, K, Ca e Mg. A análise comparativa das concentrações de N, P, K e Mg nas folhas do milho, nas várias lâminas de irrigação, não mostra de maneira muito evidente uma tendência que possa definir as participações das diferentes proporções de silicato de cálcio na absorção dos mesmos. As maiores e menores concentrações desses nutrientes na folha se alternam entre as diferentes proporções de silicato de cálcio aleatoriamente, nas várias lâminas de irrigação. Todavia, com relação às concentrações de Ca e S, é possível observar tendência bastante interessante. Excetuando-se a lâmina de 130% no caso do Ca e a de 100% para o S, em todas as demais lâminas de irrigação, as concentrações mais elevadas desses elementos se verificam na ausência de silicato de cálcio. Nas lâminas de 30 e 70% constata-se de maneira marcante a importância do silicato de cálcio na absorção desses nutrientes. Nessas lâminas as concentrações de Ca e S na folha acompanham sistematicamente as elevações nas proporções de silicato de cálcio.

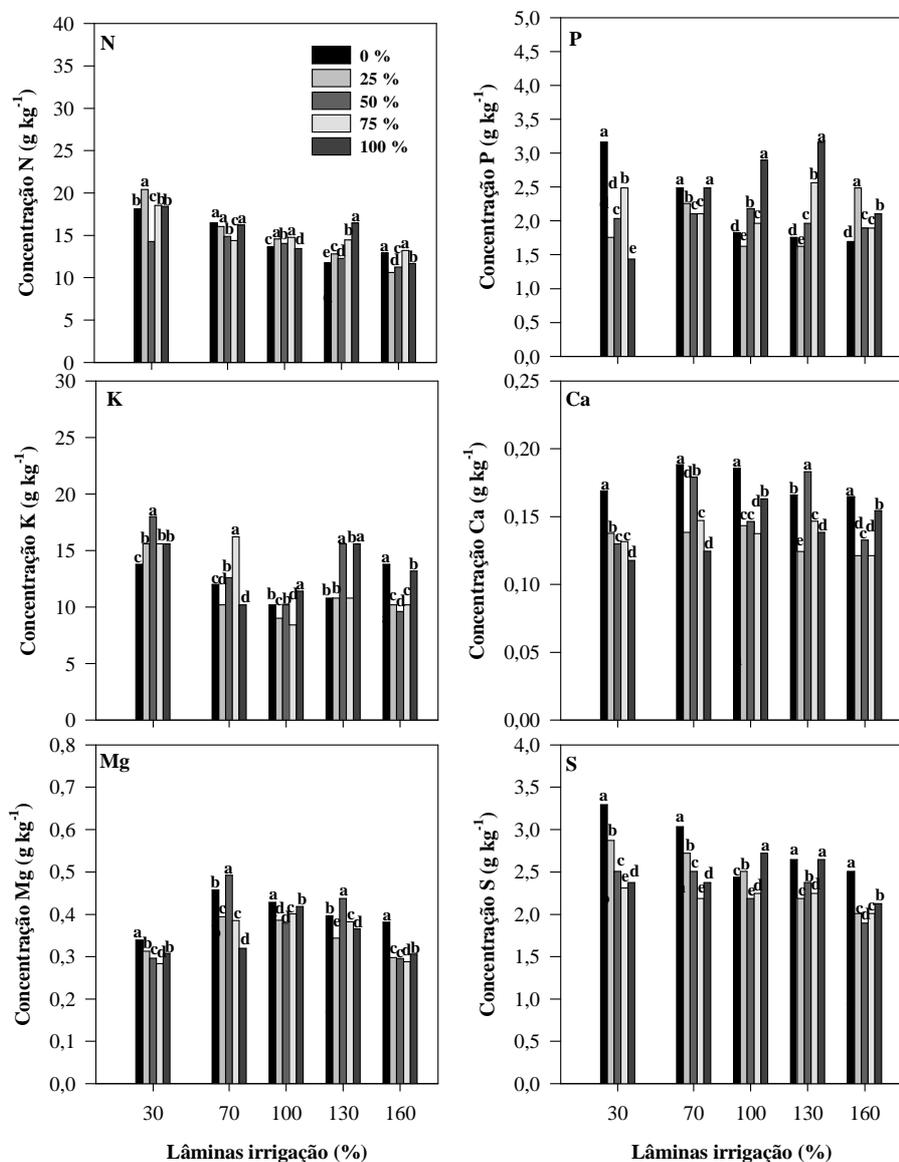


Gráfico 28 Concentrações de macronutrientes na folha do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

No Gráfico 29 estão as concentrações dos micronutrientes B, Zn, Mn, Fe e Cu nas folhas do milho influenciadas pelas proporções de silicato de cálcio em cada uma das diferentes lâminas de irrigação. Analisando inicialmente o B, observa-se que, nas lâminas de irrigação de 30 e 70%, as suas concentrações não revelam qualquer tendência, quando associadas às proporções de silicato de cálcio, aliás, na lâmina de 30%, a maior concentração de B ocorre exatamente na ausência de silicato de cálcio. Entretanto, nas lâminas de 100, 130 e 160% é evidente a participação do silicato de cálcio na acumulação do B nas folhas do milho. Nessas lâminas as maiores concentrações de B se encontram associadas às maiores proporções de silicato de cálcio. Quanto às concentrações de Zn, não existem evidências claras da participação do silicato de cálcio em suas acumulações nas folhas do milho, nas várias lâminas de irrigação. As maiores e menores concentrações de Zn se alternam, aleatoriamente, entre as diferentes proporções de silicato de cálcio, nas várias lâminas de irrigação. As concentrações de Mn, Fe e Cu, nas folhas de milho, apresentam um comportamento antagônico às elevações das proporções de silicato de cálcio. Observa-se para esses três micronutrientes que, nas várias lâminas de irrigação, suas concentrações nas folhas de milho diminuem à medida que se aumentam as proporções de silicato de cálcio. Estes resultados estão relacionados na influência do silício na absorção e translocação de vários macro e micronutrientes e, frequentemente, diminui ou elimina o efeito adverso do excesso de metais no meio sobre as plantas, especialmente do Mn^{2+} (EPSTEIN, 1994). Interações entre o silício e o Mn^{2+} durante a absorção, são pouco prováveis, pois o Mn^{2+} é absorvido como cátion divalente enquanto o ácido silícico é a forma na qual o silício é absorvido e translocado (MARSCHNER, 1995). Contudo, o aumento da tolerância das plantas ao Mn^{2+} pode estar relacionado à maior absorção e redistribuição do silício (FOY et al., 1978). Os possíveis mecanismos de tolerância das plantas ao Mn^{2+} pelo silício são

contraditórios. Alguns pesquisadores observaram que o silício aumentou a tolerância ao Mn^{2+} , por diminuir sua absorção (TAKAHASHI; MA; MIYAKE, 1990).

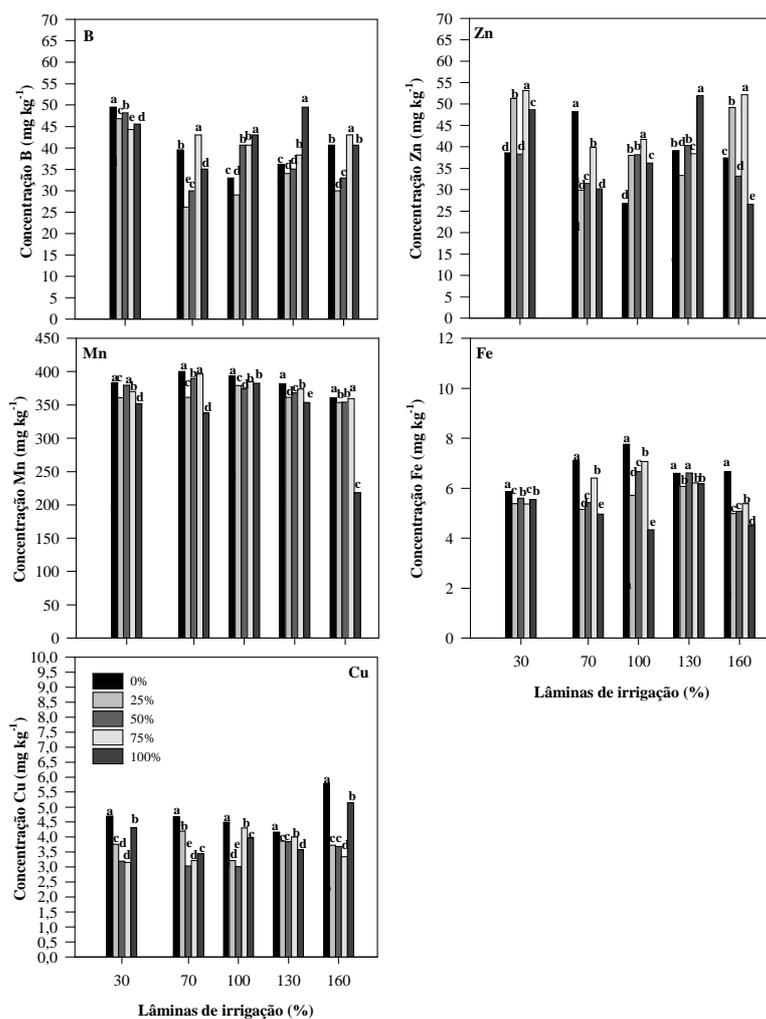


Gráfico 29 Concentrações de micronutrientes na folha do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

4.7.3 Concentração de macro e micronutriente palha na espiga

O Gráfico 30 apresenta as concentrações dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S na palha da espiga, em função das proporções de silicato de cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. Nota-se, inicialmente, tendência de diminuição nas concentrações desses elementos, à medida que eleva a quantidade de água aplicada pelas diversas lâminas de irrigação. A análise do comportamento das concentrações dos macronutrientes na palha da espiga, frente às proporções de silicato de cálcio na palha da espiga revela alguns aspectos interessantes. As proporções de silicato de cálcio influenciam as concentrações de N na palha da espiga de maneira não sistemática, nas diversas lâminas de irrigação. Não é possível identificar uma tendência consistente. Dependendo da lâmina de irrigação, qualquer uma das proporções de silicato de cálcio pode estar associada à maior ou menor concentração de N. Para as concentrações de P pode-se afirmar que, com exceção da lâmina de 30%, a proporção de silicato de cálcio relativa a 50% é aquela que propicia as maiores concentrações do elemento na palha da espiga. A presença do silicato de cálcio, isoladamente ou a sua total ausência, mostraram-se inadequadas para a absorção e acumulação do P na palha de espiga. Esse último aspecto pode ser estendido para as concentrações de K, Ca e Mg. Invariavelmente, as menores concentrações desses nutrientes ocorrem na presença de 100% de silicato de cálcio ou presença de 100% de calcário (0% de silicato). As maiores concentrações de K, Ca e Mg se associam às proporções 25, 50 ou 75% de silicato dependendo da lâmina de irrigação. No caso do S, embora pouco evidente, pode-se afirmar que suas concentrações aumentam com o aumento das proporções de silicato de cálcio.

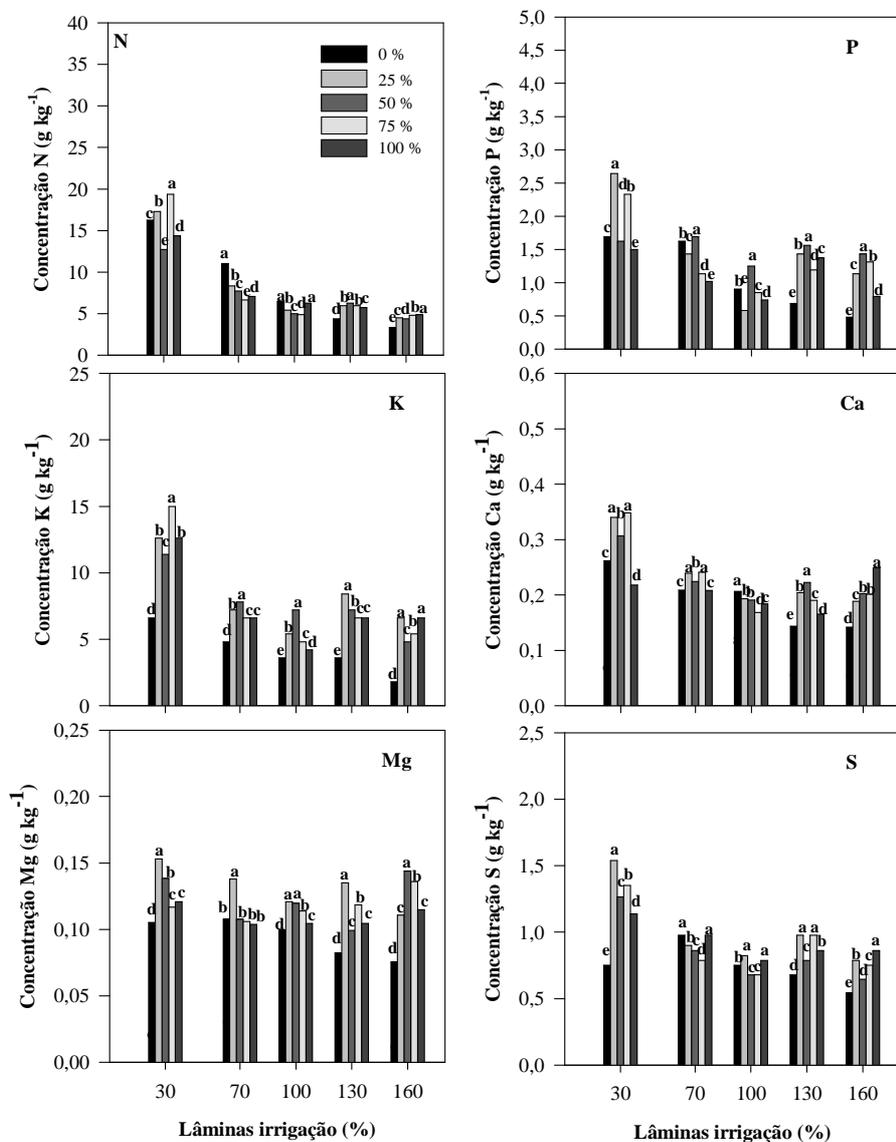


Gráfico 30 Concentrações de macronutrientes na palha da espiga do milho em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

O Gráfico 31 apresenta as concentrações dos micronutrientes B, Zn, Mn, Cu e Fe na palha da espiga do milho, em função das diferentes proporções de silicato de cálcio, dentro de cada lâmina de irrigação. Observa-se para o B que, em todas as lâminas de irrigação, as maiores concentrações estão associadas à presença do silicato de cálcio e do calcário puros. As misturas desses corretivos, em quaisquer proporções, acarretam menores concentrações do B na palha da espiga do milho. A influência das proporções de silicato de cálcio, sobre as concentrações de Zn na palha da espiga, não se mostra muito evidente. As maiores e menores concentrações de Zn são encontradas tanto na presença do silicato de cálcio puro, em várias proporções e, ainda, na sua ausência. Pode-se destacar, no entanto, que as menores concentrações de Zn se acham associadas à proporção de 25% de silicato de cálcio. Nas concentrações de Mn, Cu e Fe na palha da espiga, também, não evidenciam tendências marcantes da influência das proporções de silicato de cálcio nas várias lâminas de irrigação. Chama a atenção, todavia, o fato das menores concentrações desses micronutrientes estarem sempre associadas à total ausência ou à presença exclusiva do silicato de cálcio como corretivo. Outro aspecto curioso diz respeito às concentrações na lâmina de 160%. Nessa lâmina observa-se que as concentrações de Mn, Cu e Fe apresentam comportamentos idênticos em relação às proporções de silicato de cálcio. Verifica-se que as concentrações desses micronutrientes na palha da espiga aumentam nas mesmas intensidades que se elevam as proporções de silicato de cálcio.

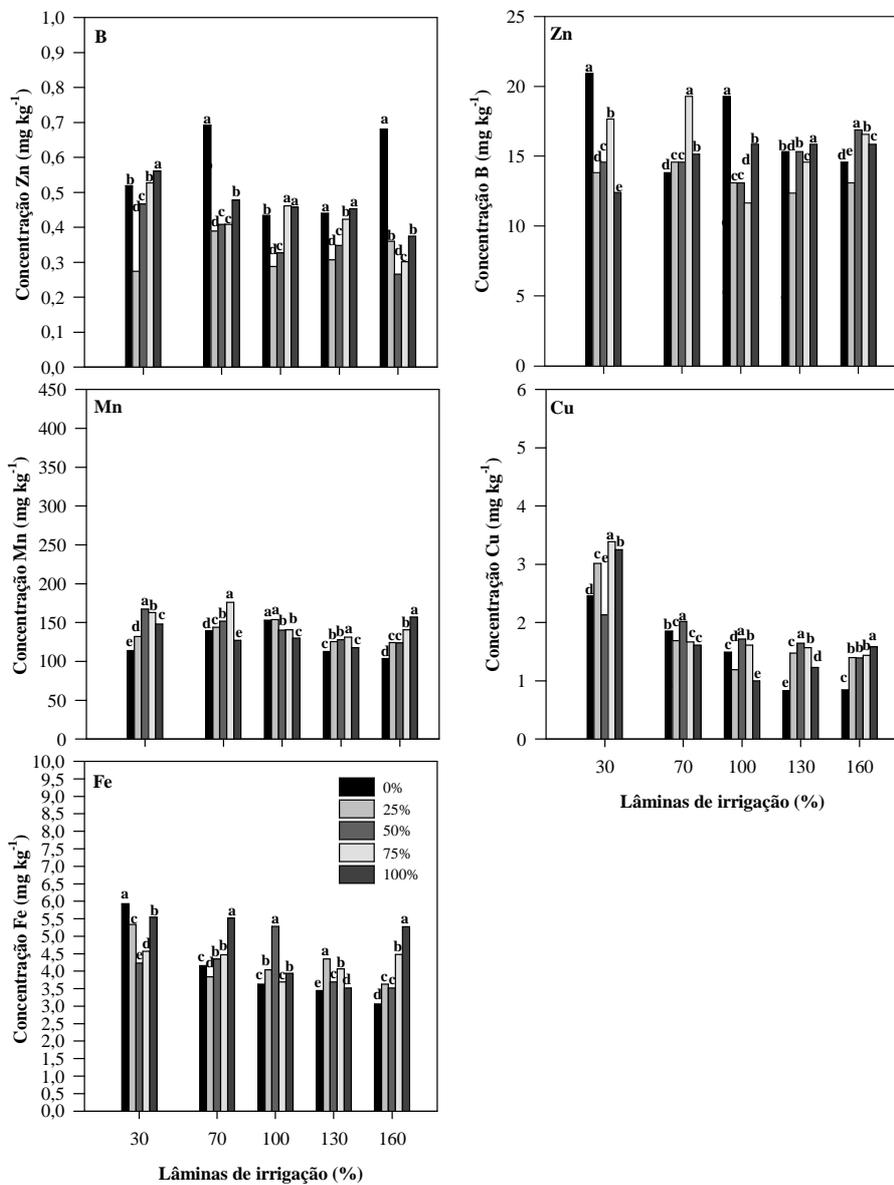


Gráfico 31 Concentrações de micronutrientes na palha da espiga do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

4.7.4 Concentrações de macro e micronutriente no sabugo da espiga

O Gráfico 32 apresenta as concentrações dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S no sabugo da espiga em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação. Como comentado para outras partes da planta de milho, nota-se tendência de diminuição das concentrações de todos os nutrientes à medida que se elevam as lâminas de irrigação. As maiores concentrações de N e K se verificam, em todas as lâminas, na ausência do silicato de cálcio. Exceção se verifica para o N na lâmina de 160%, na qual a maior concentração é encontrada na presença de 100% de silicato de cálcio. No caso do N, as menores concentrações se associam às proporções de 50 e 75% de silicato. Já para o K, as menores concentrações são observadas, em todas as proporções de silicato de cálcio, dependendo da lâmina de irrigação. O comportamento das concentrações de P tende a ser antagônico aos do N e K. As menores concentrações de P no sabugo se encontram associadas à ausência do silicato de cálcio. Todavia não é possível afirmar que essas concentrações aumentam nas mesmas intensidades dos aumentos das proporções de silicato. Um aspecto interessante é que, à medida que se elevam as lâminas de irrigação, as maiores concentrações de P no sabugo se associam às maiores proporções de silicato de cálcio. As concentrações de S apresentam dois comportamentos distintos, considerando as lâminas de irrigação. Nas lâminas de 30 e 70%, não é possível visualizar uma influência marcante das proporções de silicato de cálcio nas concentrações de S no sabugo. Todavia, nas lâminas de 100, 130 e 160%, as concentrações de S aumentam na mesma intensidade do aumento das proporções de silicato de cálcio. Ca e Mg apresentam comportamentos semelhantes e com tendências bastante evidentes. Em todas as lâminas de irrigação, as maiores concentrações de Ca e Mg estão associadas à proporção de 25% de silicato de cálcio, enquanto as menores concentrações são encontradas na sua ausência.

Exceção a essa afirmativa se verifica nas lâminas de 130 e 160%, nas quais as maiores concentrações de Mg ocorrem quando o silicato de cálcio se encontra na proporção 75%.

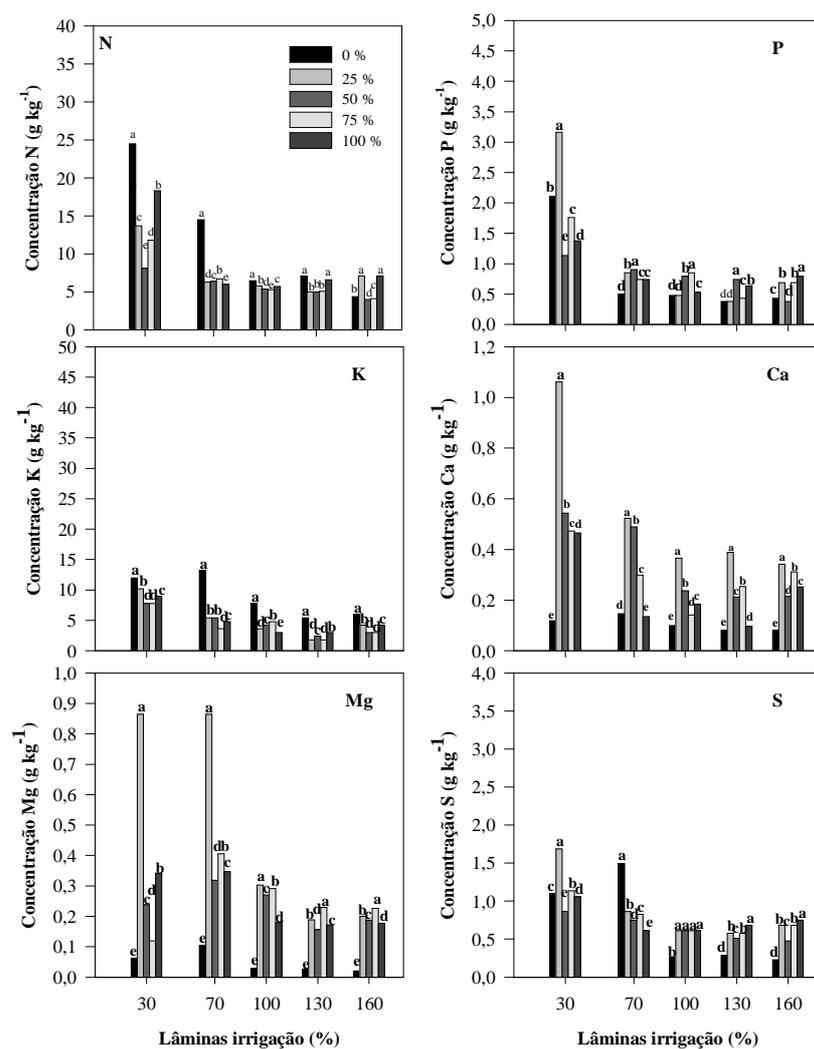


Gráfico 32 Concentrações de macronutrientes no sabugo da espiga do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

O Gráfico 33 apresenta as concentrações dos micronutrientes Zn, B, Mn, Cu, e Fe no sabugo da espiga do milho, em função das proporções de silicato e cálcio, nas diversas lâminas de irrigação. No exemplo dos macronutrientes, pode-se afirmar que as concentrações dos micronutrientes, também, decrescem à medida que se elevam as lâminas de irrigação. Relativamente às proporções de silicato de cálcio, não se observam tendências fortes de associação das mesmas concentrações dos diferentes micronutrientes no sabugo, nas várias lâminas de irrigação. Verifica-se, todavia, que, nas lâminas de 30, 70 e 100%, as maiores concentrações de Zn no sabugo são encontradas na ausência de silicato de cálcio. Contraditoriamente, na lâmina de 160% a maior concentração de Zn é encontrada na presença de 100% de silicato e a menor na sua ausência. O B tem comportamento semelhante ao Zn. Nas lâminas de 30, 70, 100, e 130%, as maiores concentrações de B no sabugo são encontradas na ausência do silicato de cálcio. As menores concentrações variam entre proporções de silicato e lâminas de irrigação. Não é possível estabelecer um padrão de comportamento para as concentrações de Mn e Cu. Já para o Fe, com exceção da lâmina de 30%, pode-se afirmar que seu comportamento é antagônico ao do B e Zn. As concentrações de Fe no sabugo tendem a decrescer com o aumento das proporções de silicato.

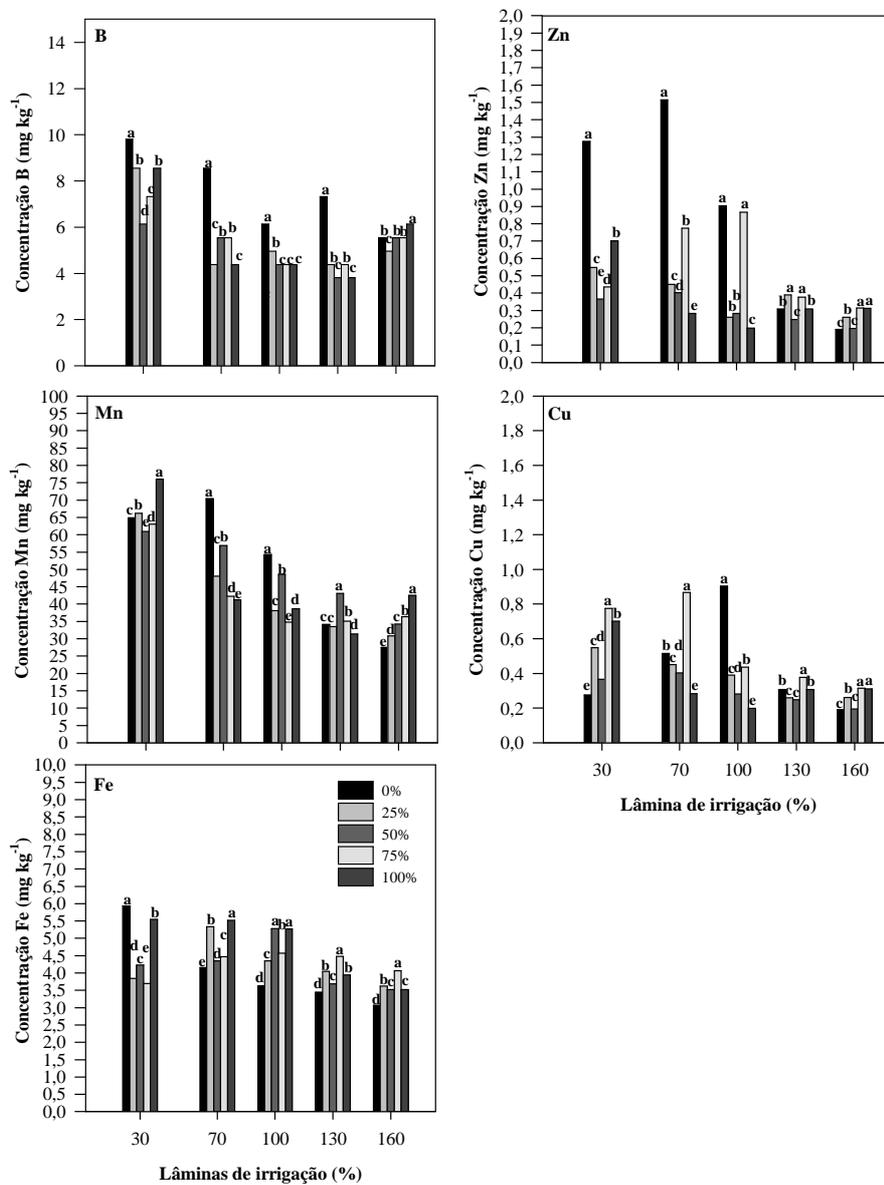


Gráfico 33 Concentrações de micronutrientes no sabugo da espiga do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação

4.7.5 Concentrações de macro e micronutriente no grão do milho

O Gráfico 34 apresenta as concentrações dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S no grão do milho em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação. Como encontrado para outras partes da planta de milho, nota-se tendência de diminuição das concentrações dos nutrientes à medida que se elevam as lâminas de irrigação. A influência do silicato de cálcio nas concentrações dos macronutrientes no grão do milho não se mostra muito evidente. Pode-se, entretanto afirmar que, independentemente da lâmina de irrigação, as maiores concentrações estão associadas às maiores proporções de silicato de cálcio. Para o N, e apenas para a lâmina de irrigação de 30%, essa tendência não se confirma. Nessa lâmina, a menor concentração de N é encontrada, exatamente, com a presença de 100% de silicato de cálcio, enquanto a segunda maior concentração é encontrada na ausência do silicato. Nas lâminas de 100, 130 e 160% as maiores concentrações de N são encontradas quando o silicato de cálcio se apresenta com a proporção de 75%. Já para o P, K, Mg e S tendem a apresentar comportamentos semelhantes ao N. No caso do S, observa-se, nas lâminas de 30 e 70%, que suas concentrações no grão diminuem com o aumento das proporções de silicato de cálcio. O Ca é o único dos macronutrientes em que a influência do silicato de cálcio se encontra, nitidamente, caracterizada. Verifica-se, em todas as lâminas de irrigação, que as concentrações de Ca no grão aumentam, significativamente, com o aumento das proporções de silicato de cálcio. As maiores concentrações de cálcio no grão são encontradas na presença do silicato de cálcio puro (proporção 100%) e as menores concentrações na sua ausência (proporção 0%).

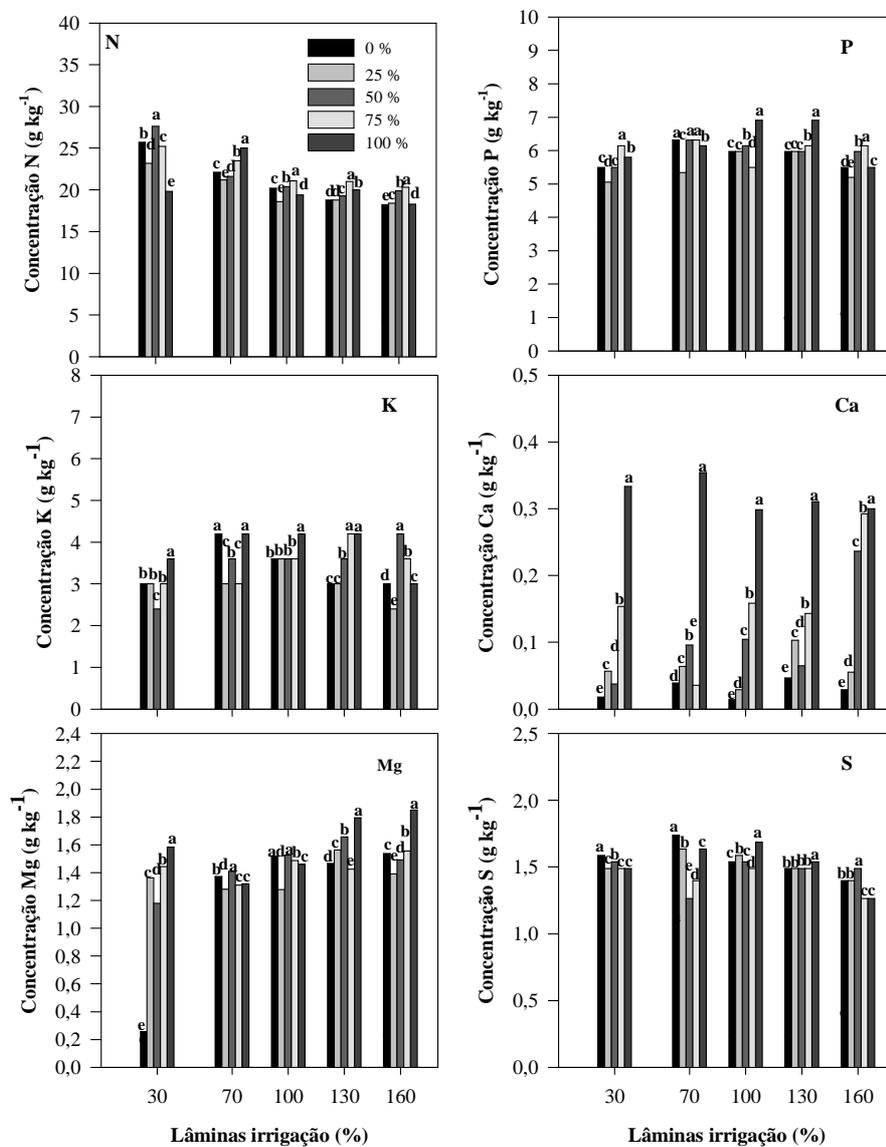


Gráfico 34 Concentração de macronutrientes no grão do milho em relação às diferentes lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio

O Gráfico 35 apresenta as concentrações dos micronutrientes Zn, B, Mn, Cu e Fe no grão do milho, em relação às proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas e irrigação. Mais uma vez fica evidente, em todas as proporções de silicato de cálcio, a tendência de redução das concentrações dos micronutrientes no grão do milho, à medida que se elevam as lâminas de irrigação. Um aspecto interessante a ser observado é que, para todos os micronutrientes, na lâmina de irrigação de 70%, as maiores concentrações são encontradas na ausência (proporção 0%) do silicato de cálcio, enquanto as menores ocorrem, exatamente, quando a correção do solo é feita, exclusivamente (proporção 100%), com esse composto. A partir da lâmina de 100%, exceto para o B nas lâminas de 100 e 130% e Fe na lâmina de 100%, essa tendência parece se inverter e a presença do silicato de cálcio tende a favorecer a absorção e a acumulação dos diferentes micronutrientes no grão do milho. Nenhuma outra tendência digna de registro pode ser feita a respeito da influência das diferentes proporções de silicato de cálcio sobre as concentrações de micronutrientes no grão do milho.

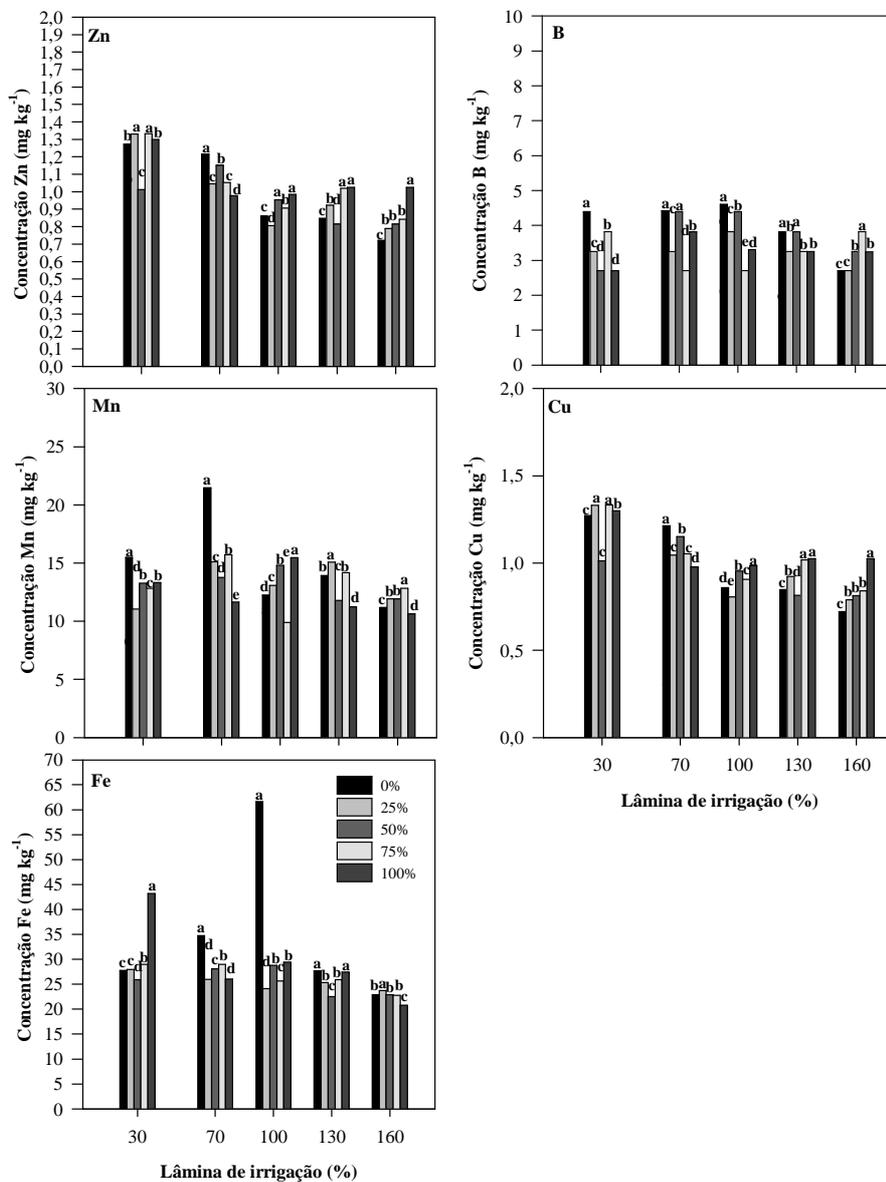


Gráfico 35 Concentração de micronutrientes no grão do milho em relação às diferentes lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio

4.7.6 Concentrações de silício nas diferentes partes da planta de milho

As espécies vegetais variam grandemente em sua capacidade de absorver e acumular silício nos tecidos, podendo, em função dos percentuais de SiO_2 na matéria seca, serem classificadas como: a) plantas acumuladoras, que incluem muitas gramíneas, como o arroz, contendo acima de 4% de SiO_2 ; b) intermediárias, com teores de SiO_2 , variando entre 2-4% (cereais, cana-de-açúcar e poucas dicotiledôneas); c) plantas não acumuladoras, incluindo a maioria das dicotiledôneas, apresentando valores menores que 2% de SiO_2 , como feijão (MA; TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005). Essas diferenças na acumulação de silício têm sido atribuídas à habilidade das raízes em absorver esse nutriente (TAKAHASHI; MA; MIYAKE, 1990), mas o mecanismo exato envolvido exatamente, ainda, não é bem compreendido.

O Gráfico 36 apresenta as concentrações de silício no colmo (A), folha (B), palha da espiga (C), sabugo (D) e grão de milho (E), em relação às proporções de silicato de cálcio, em cada uma das diferentes lâminas de irrigação. Como comentário geral, pode-se afirmar que as concentrações de Si na folha e na palha da espiga, independentemente da proporção de silicato de cálcio, aumentaram à medida que se elevaram as lâminas de irrigação. No colmo, sabugo e grão, as concentrações de Si não apresentam qualquer alteração de comportamento em relação às lâminas de irrigação empregadas. Considerando o silicato de cálcio presente no corretivo do solo, como fonte de Si para o milho e, ainda, a sua redistribuição das diferentes partes da planta, o Gráfico 41 revela aspectos bastante interessantes. A presença do silicato de cálcio no corretivo, nas várias proporções, não influenciou as concentrações de Si no colmo, sabugo e grãos do milho. O mais intrigante é que observa-se, por exemplo, no colmo para as lâminas de 30 e 160%, no sabugo para as lâminas de 130% e grãos, na completa ausência do silicato no corretivo, são encontradas as

maiores concentrações de Si nessas partes da planta de milho. Por outro lado, nas folhas e palha da espiga a presença do silicato de cálcio no corretivo tem reflexos positivos nas concentrações de Si. Observa-se que, em todas as lâminas de irrigação, as concentrações de Si se encontram associadas às maiores proporções de silicato de cálcio.

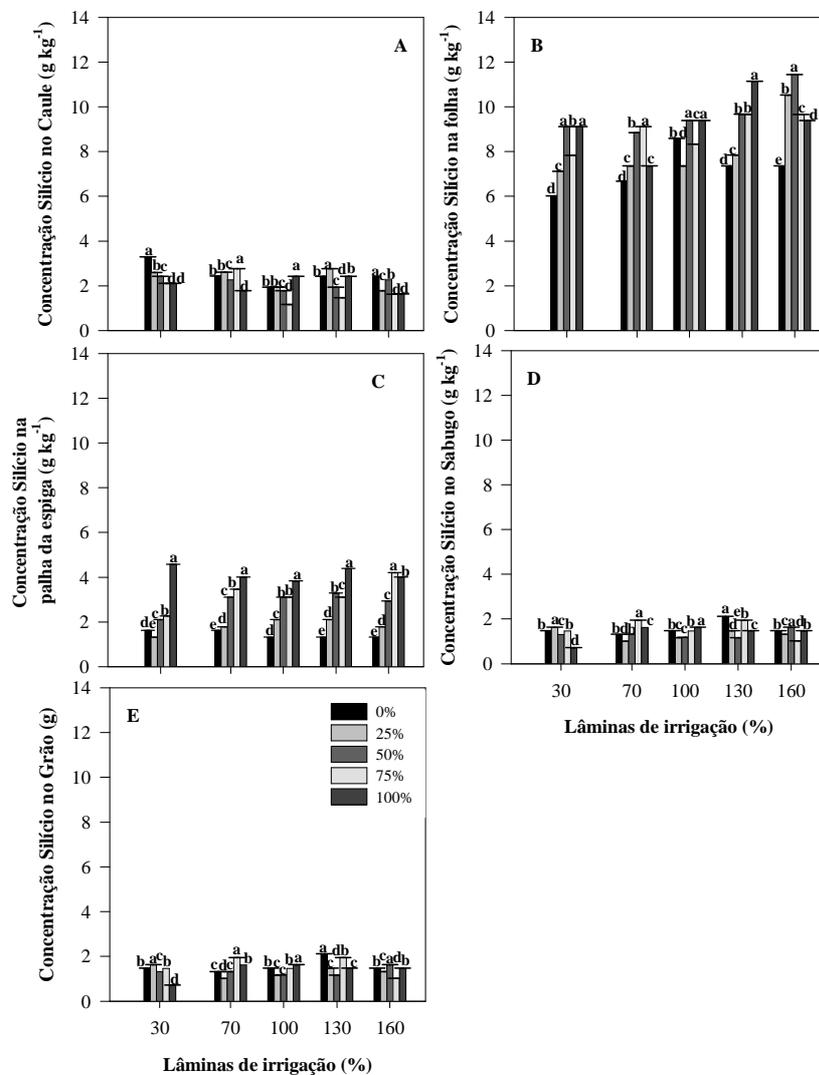


Gráfico 36 Concentração de silício no colmo, folha, palha da espiga, sabugo da espiga e no grão do milho em relação às diferentes lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio

4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura/Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva

4.8.1 Porcentagem de silício na folha de milho

O Gráfico 37 ilustra o comportamento da porcentagem de silício na folha de milho em função das proporções de silicato de cálcio para as diferentes lâminas de irrigação. Observa-se que, em todas as lâminas de irrigação, a porcentagem de silício aumenta, linearmente, com o incremento das proporções de silicato de cálcio. Nas lâminas de 30 e 70%, as equações apresentam menor inclinação que nas demais lâminas, refletindo a importância da água no transporte do Si para as folhas do milho. Os dados encontrados no experimento para 30, 70, 100, 130 e 160% lâmina de irrigação aumentaram em função das diferentes proporções de silicato de cálcio. Nota-se que a maior concentração de silício foi para a proporção de 100% silicato de cálcio. Para a porcentagem de silício nas folhas de milho (Gráfico 38) notou-se que as maiores porcentagens de silício foram para a proporção de 100% de silicato de cálcio em função das diferentes lâminas de irrigação. A planta absorve água para atender às suas necessidades fisiológicas e, com isto, suprir a sua necessidade em nutrientes, que são transportados junto com a água, sob a forma de fluxo de massa. Do total de água absorvida pela planta, uma quantidade bem reduzida (cerca de 1%) é retida pela mesma. Embora se possa pensar que há desperdício, na verdade, isso não ocorre, pois é pelo processo de transpiração que os vegetais controlam a sua temperatura (MAGALHÃES; DURAIS, 2008). Os elementos dissolvidos são, assim, carregados pela água para a superfície radicular por de massa e a quantidade do mineral entra em contato com a raiz. O transporte à longa distância nas plantas é limitado aos vasos do xilema e grandes quantidades de Si são depositadas na parede celular desses vasos (BALASTRA et al., 1989). Isso

pode ser importante para prevenir a compressão dos vasos xilemáticos quando a taxa de transpiração é elevada (RAVEN, 1983). Os dados encontrados pela Microscopia Eletrônica de Varredura confirmam os resultados, obtidos nas determinações das concentrações de Si na folha, apresentados na Gráfico 41 e discutidos anteriormente. Pela técnica de microanálise de raio X e mapeamento para Si, Pozza et al. (2004) verificaram uma distribuição uniforme do elemento em toda superfície abaxial de folhas de cafeeiros. Além disso, também, constaram que as plantas tratadas com silício apresentaram maior quantidade de Fe e presença de Cu e Zn, os quais não foram observados nas plantas testemunhas.

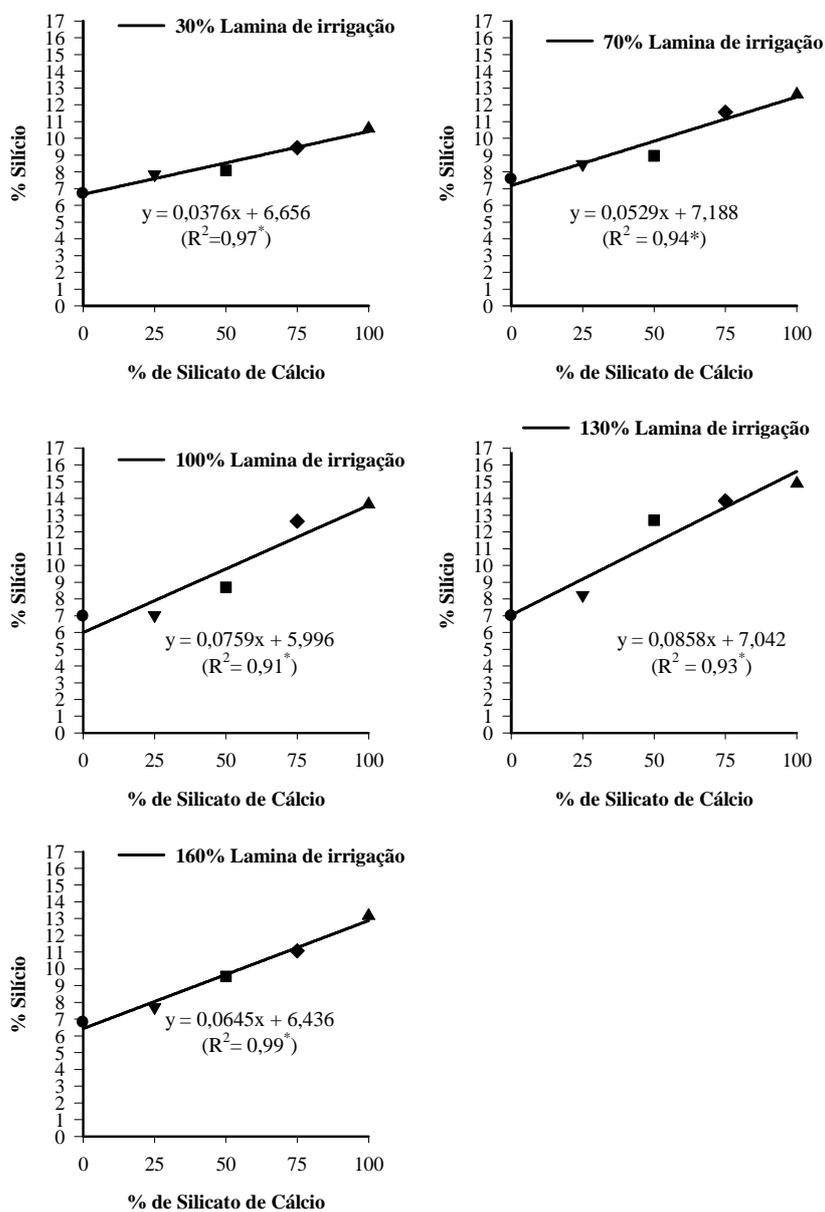


Gráfico 37 Porcentagem de silício em amostras de folha de milho em função de diferentes proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação

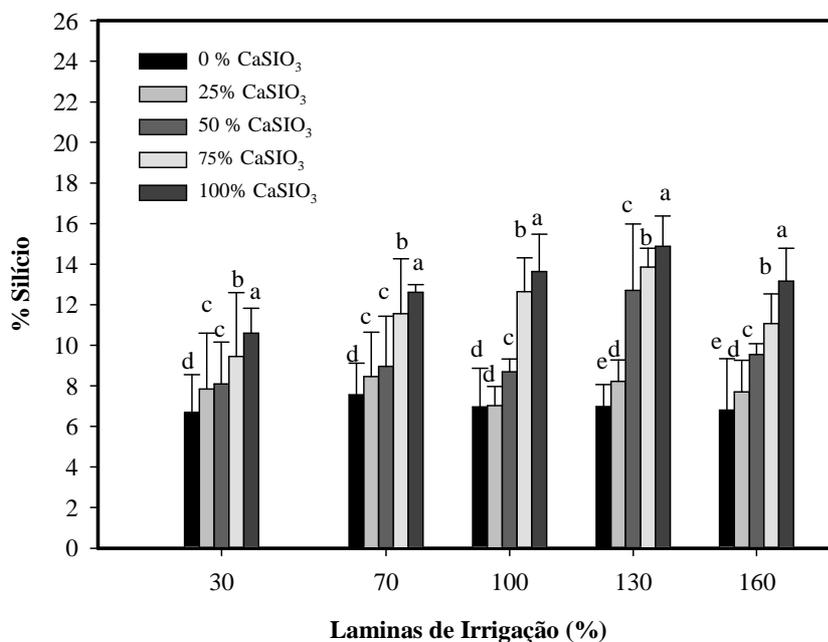


Gráfico 38 Porcentagem de silício em amostras de folha de milho em relação às diferentes % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação

4.8.2 Porcentagem de cálcio na folha de milho

O comportamento da porcentagem de cálcio nas folhas de milho, em função das proporções de silicato de cálcio, nas diferentes lâminas de irrigação é ilustrado no Gráfico 39. Observa-se, em todas as lâminas de irrigação, que a porcentagem de cálcio na folha decresce, linearmente, com o aumento das proporções de silicato de cálcio. Essa mesma tendência foi observada e discutida na análise das concentrações de Ca na folha (Gráfico 29) e na palha da espiga (Gráfico 30). O Gráfico 40, embora apresente as mesmas informações do Gráfico 43, evidencia mais claramente que, independentemente da proporção de silicato de cálcio, as concentrações de Ca na folha aumentam à medida que se

elevam as lâminas de irrigação. Os elementos dissolvidos são, assim, carregados pela água para a superfície radicular por de massa e a quantidade do mineral entra em contato com a raiz. No processo de absorção, as interações catiônicas nos sítios de adsorção e a concentração de íons nutrientes na solução do solo, constituem aspectos de importância na nutrição das plantas e produção das culturas (KHASAWNEH, 1971). A taxa de absorção de um nutriente pela planta depende dos cátions dissolvidos na solução de solo em equilíbrio dinâmico com os cátions do complexo de troca (BULL, 1986). A absorção de um nutriente é afetada, também, pela natureza dos cátions complementares, isto é, há influência de um íon adsorvido sobre a liberação de outro, para a solução do solo, a partir da superfície trocadora, além das relações que envolvem os cátions no solo (TISDALE; NELSON; BEATON, 1985). Na avaliação da capacidade potencial de fertilidade dos solos, devem ser ajustadas as relações entre cátions para a cultura, em vista das interações competitivas entre diferentes íons nutrientes que influem na disponibilidade e possibilidade de absorção da célula por meio da membrana (EPSTEIN, 1975). O cálcio é absorvido pelas raízes como Ca^{2+} na solução do solo. Geralmente, a concentração de Ca^+ na solução do solo é bem maior que a de K^+ . No entanto, a taxa de absorção de Ca^{2+} é, normalmente, menor do que aquela observada para o K^+ . Isto é em razão de ser Ca^{2+} absorvido apenas pelas extremidades das radiculares, onde as paredes celulares da endoderme não foram, ainda, suberizadas. As reações de troca no xilema são muito importantes para o movimento ascendente do Ca na planta: o Ca^{2+} é deslocado dos sítios de troca por outros cátions. A taxa de redistribuição do Ca é muito pequena, em função de sua concentração no floema ser muito baixa. A Tabela 3.8 mostra que, ao contrário do observado para o K, a maior parte do Ca do tecido vegetal está em formas insolúveis em água (FAQUIN, 2005).

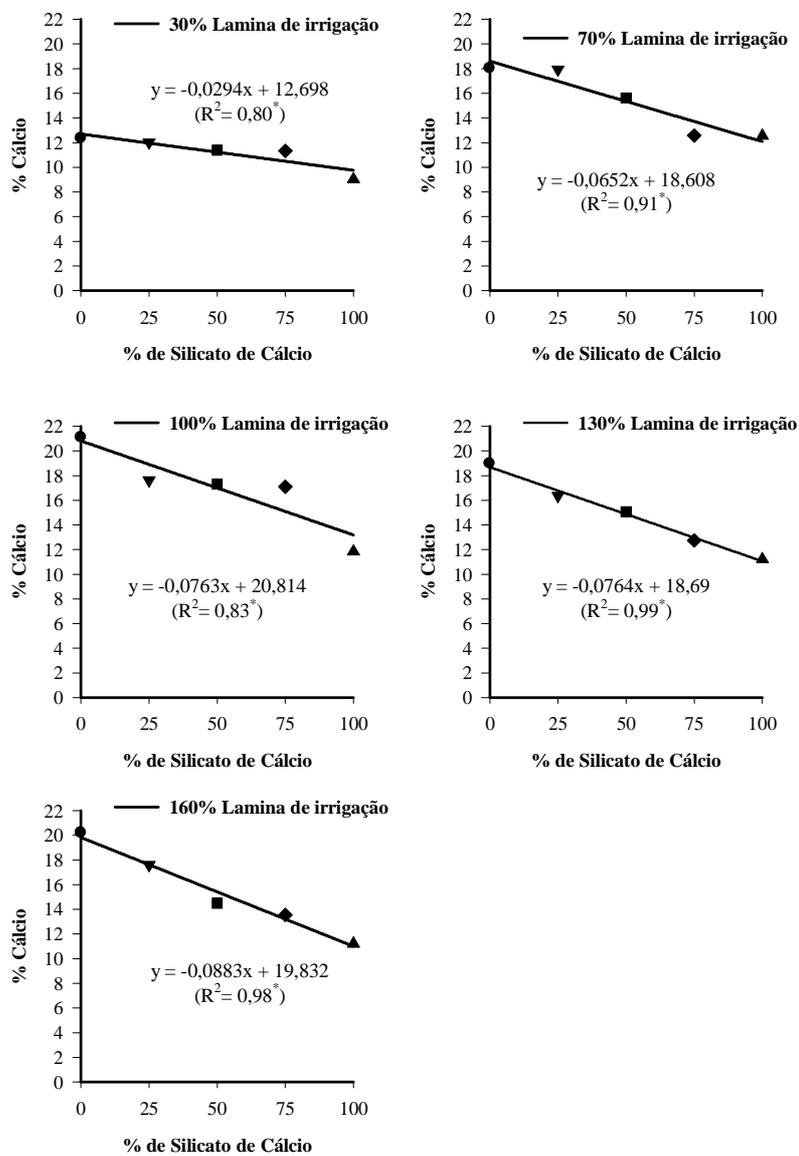


Gráfico 39 Porcentagem de cálcio em amostras de folha de milho em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação

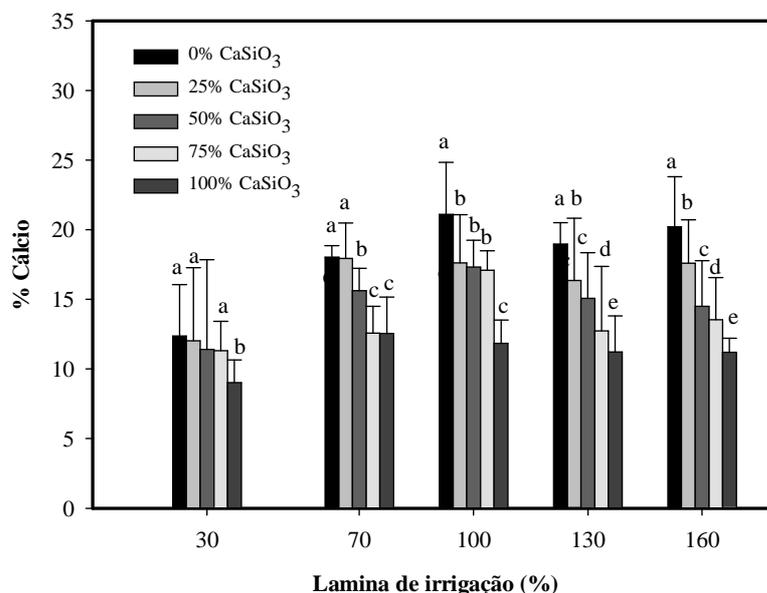


Gráfico 40 Porcentagem de cálcio em amostras de folha de milho em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação

4.9 Avaliações fisiológicas das plantas

4.9.1 Potencial hídrico do xilema na folha de milho

O Gráfico 41 apresenta o Ψ_w do xilema na folha de milho, em função das diferentes proporções de silicato de cálcio e das diversas lâminas de irrigação. Independente das proporções de silicato e da hora em que foi realizada a leitura (6 e 14 horas), aos 30 dias após plantio, o maior Ψ_w do xilema nas folhas do milho foi para o tratamento com adição do silicato de cálcio puro. Estes resultados estão associados à maior concentração de silício nas folhas de milho (Gráfico 37 e 38) o que pode ter aumentado a espessura da parede celular

e com isso aumentou a eficiência nas trocas gasosas. Os resultados encontrados no trabalho evidenciam os efeitos benéficos do uso de silício, relativamente elevada para maiores Ψ_w para as menores lâminas irrigação. Este efeito é benéfico para a adaptação das plantas à limitação hídrica. A utilização de indicadores da condição hídrica das plantas como o potencial de água na folha, pode ser uma ferramenta importante no monitoramento da disponibilidade de água no solo e da necessidade de irrigação (BERGONCI et al., 2000). O potencial da água é uma medida importante e sensível para avaliar o Ψ_w da planta, que varia de valores próximos de zero nas plantas sem estresse hídrico (KRAMER; BOYER, 1995). Mesmo com variações ao longo do dia, estresse de curto prazo, em plantas irrigadas, o potencial de água na folha tem sido utilizado em estudos das relações hídricas dos vegetais (HSIAO, 1973) e é considerado padrão do estado hídrico da planta. Mesmo não sendo considerado um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o silício tem sido associado a diversos efeitos benéficos, dentre os quais se destacam: o baixo coeficiente de transpiração, com melhor aproveitamento da água; o maior teor de clorofila e a maior rigidez estrutural dos tecidos, com o aumento da resistência mecânica das células, deixando as folhas mais eretas e aumentando a área fotossintética e a absorção de CO_2 . Somam-se a isto, a diminuição do sombreamento e a redução do acamamento; o aumento do número de folhas e da matéria seca; o retardo da senescência e a proteção contra estresses bióticos, por meio da diminuição da incidência de patógenos e do aumento da resistência a insetos pela formação de uma barreira mecânica. Também está envolvido na tolerância a estresses abióticos, como o salino, tornando as células mais tolerantes (EPSTEIN, 1999).

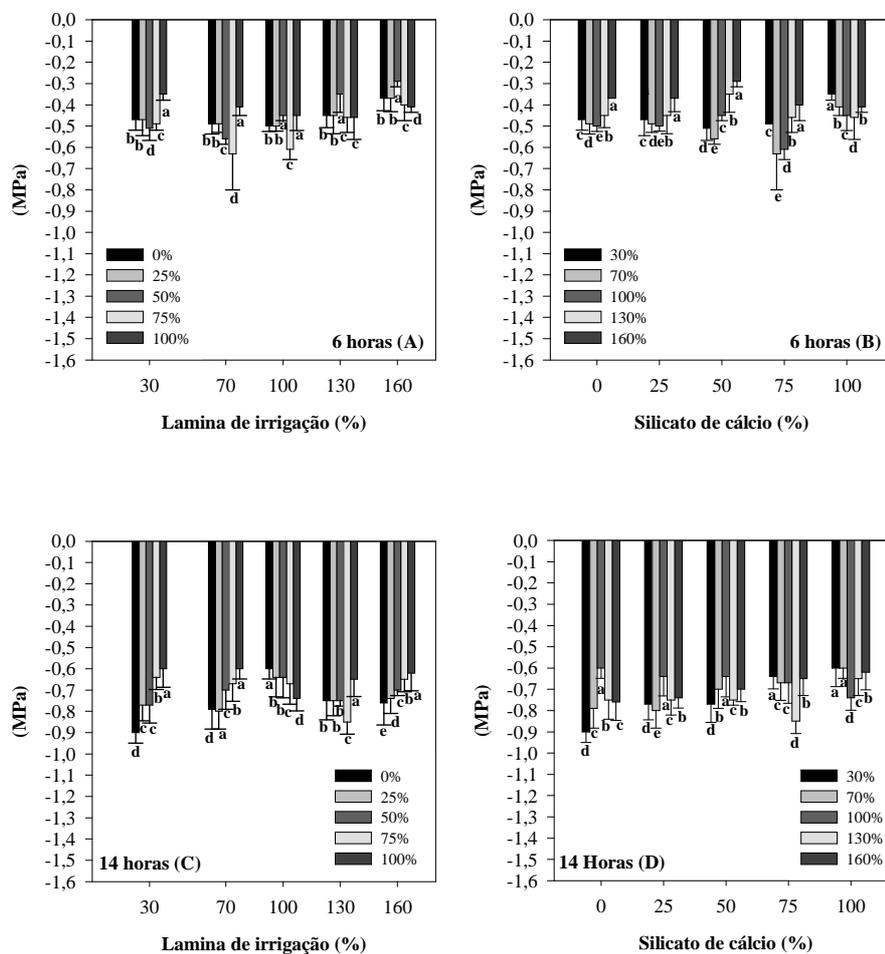


Gráfico 41 Potencial hídrico do xilema quantificado às 6 horas (Gráfico A e B) e 14 horas (Gráfico C e D) aos 30 dias após o plantio em função das lâminas de irrigação e diferentes proporções de silicato de cálcio

O Ψ_w do xilema nas folhas de milho, determinado aos 75 dias após o plantio, apresentada no (Gráfico 42 A, B, C e D) os maiores Ψ_w mantiveram a mesma tendência da leitura realizada aos 30 dias após o plantio. Observa-se que ocorre aumento do Ψ_w com o aumento das diferentes lâminas de irrigação e das proporções de silicato de cálcio. Para as maiores aplicações de água no solo

notou-se uma tendência de maior Ψ_w nas folhas de milho para a aplicação de silicato puro apresentada no Gráfico 42 (C). A Figura 47 D revela que, na proporção de 50% de silicato de cálcio, são encontrados os maiores valores de Ψ_w . Essa proporção de silicato de cálcio proporcionou a maior produção das plantas de milho, quando à aplicação das menores laminas de irrigação, conforme Gráfico 26. Na presença de déficit hídrico, as plantas podem utilizar mecanismos de tolerância, como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados. A diminuição do potencial osmótico, em resposta ao déficit hídrico, pode resultar de uma concentração passiva de solutos, consequência da desidratação da célula, ou da acumulação ativa de solutos, mas só esta última pode ser considerada como ajuste osmótico (PATAKAS et al., 2002). O efeito da proteção mecânica é atribuído, principalmente, ao depósito de silício, na forma de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), na parede celular. A acumulação de silício nos estomas provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual, pela redução da transpiração (DATNOF; SNYDER; KORNDÖRFER, 2001), faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor. Isso pode ser de extrema importância para as plantas que crescem em solos de clima tropical, onde estão sujeitas a veranicos. Os estômatos são sensíveis ao estado hídrico da folha, tendendo a fechar com o decréscimo do potencial de água na folha. Da mesma forma, o aumento do potencial de água foliar desencadeia o processo de sua abertura. Bergonci et al. (2000), em estudos com milho, fumo e sorgo, observaram que, a partir de um determinado potencial de água na folha, ocorria um grande aumento na resistência foliar e, para o milho, esse potencial foi -1,7 MPa. Diversos estudos objetivam relacionar o potencial de água na folha com os processos fisiológicos. Os valores aproximados do Ψ_w folha de -0,5 MPa, por exemplo, são considerados adequados para o bom desenvolvimento do milho e do sorgo, enquanto -0,8 MPa inibe a fotossíntese e o crescimento de folhas e -

1,5 MPa é o ponto de murcha (SALAH; TARDIEU, 1997; KLAR; PORTO, 1998). Do total de água absorvido pela planta, cerca de 95% são utilizados para manter o equilíbrio térmico por transpiração. A variação na transpiração, portanto, afeta diretamente a temperatura da planta, notadamente a temperatura foliar (QIU et al., 2000). Na cultura do milho, os valores do potencial mínimo da água na folha foram desde -1,2 a -1,5 Mpa em plantas irrigadas (na capacidade de campo) e de -1,6 a -2,0 MPa em plantas não irrigadas (BERGONCI et al., 2000). Além disso, o potencial mínimo da água na folha correlacionou-se com o potencial matricial da água no solo a 45 cm de profundidade e mostrou ser um indicador adequado de déficit hídrico. Os autores, também, verificaram que o potencial da água na folha, ao entardecer, relacionou-se com o potencial mínimo da água na folha, evidenciando, assim, que pode ser utilizado como indicador de déficit hídrico. O potencial foliar de base apresentou diferenças evidentes entre os tratamentos extremos, mas não teve relação consistente com o potencial mínimo da água na folha.

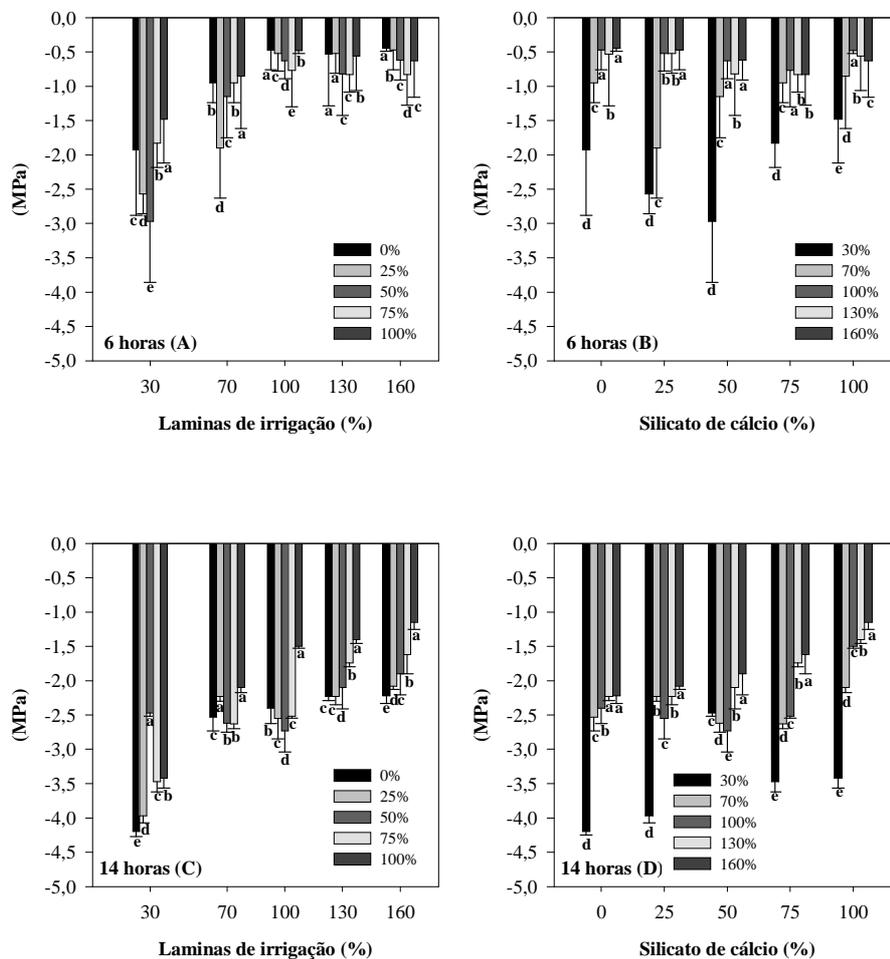


Gráfico 42 Potencial hídrico do xilema quantificado às 6 horas (Gráfico A e B) e 14 horas (Gráfico C e D) aos 75 dias após o plantio em função das lâminas de irrigação e diferentes proporções de silicato de cálcio

4.9.2 Taxa Fotossintética na folha de milho

A influência da deficiência hídrica nas trocas gasosas sobre as culturas, em especial sobre o milho (BERGONCI; PEREIRA, 2002; CRUZ et al., 2006), e outras gramíneas C_4 (GHANNOUM, 2009) em condições de estresse hídrico,

as variáveis de trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quanto por limitações metabólicas.

O Gráfico 43 apresenta a taxa fotossintética nas folhas de milho quantificado aos 30 dias após o plantio. A taxa fotossintética aumentou com a adição de silicato de cálcio em relação a cada lamina de irrigação. A mesma tendência de aumento foi observada (Gráfico 44) com nos diferentes níveis de irrigação em relação às diferentes proporções de silicato de cálcio. Os resultados encontrados, neste trabalho, evidenciam o efeito benéfico da adição de silicato de cálcio influenciando no aumento da atividade bioquímica nas folhas de milho. Esta maior fotossíntese líquida pode estar relacionada ao aumento da concentração de silício nas folhas (Gráfico 37) e maior potencial hídrico (Gráfico 42 e 43). Já para a leitura realizada aos 75 dias, após o plantio do milho, (Gráfico 45) a taxa fotossintética, também, aumentou nas folhas com o incremento do silicato em cada lamina de irrigação. A mesma tendência foi observada com o aumento da aplicação de água ao solo (Gráfico 46) em relação às diferentes adições de silicato de cálcio. Para a menor aplicação de água no solo, o tratamento controle, usando o calcário puro, a taxa fotossintética foi menor em relação aos tratamentos com adição de silicato. Com os dados encontrados no presente trabalho nota-se o efeito positivo do silício no aumento da taxa fotossintética nas folhas de milho para as menores e maiores aplicações de água no solo. O estresse hídrico tem efeito em diversos processos fisiológicos das plantas em pesquisas realizadas por Gomes Filho e Tahin (2002), Oliveira Fernandes e Rodrigues (2005), Mendes et al. (2007) e Endres et al. (2010). A avaliação do status hídrico das plantas, quando submetidas à deficiência hídrica nas fases vegetativa e reprodutiva, demonstra que cultivares de feijão-de-corda sofreram reduções significativas no potencial hídrico foliar, condutância

estomática e transpiração foliar, com conseqüente aumento na temperatura da folha (MENDES et al., 2007). Em plantas de feijão o déficit hídrico diminui a condutância estomática e aumenta a resistência difusiva ao vapor de água, mediante fechamento dos estômatos, reduzindo a transpiração e, em conseqüência, o suprimento de CO₂ para a fotossíntese (OLIVEIRA; FERNANDES; RODRIGUES, 2005). Para Larcher (2000), os estômatos atuam como moduladores da perda de água pela transpiração respondendo ao déficit hídrico com a alteração da abertura do poro a uma faixa crítica de valores do potencial hídrico foliar.

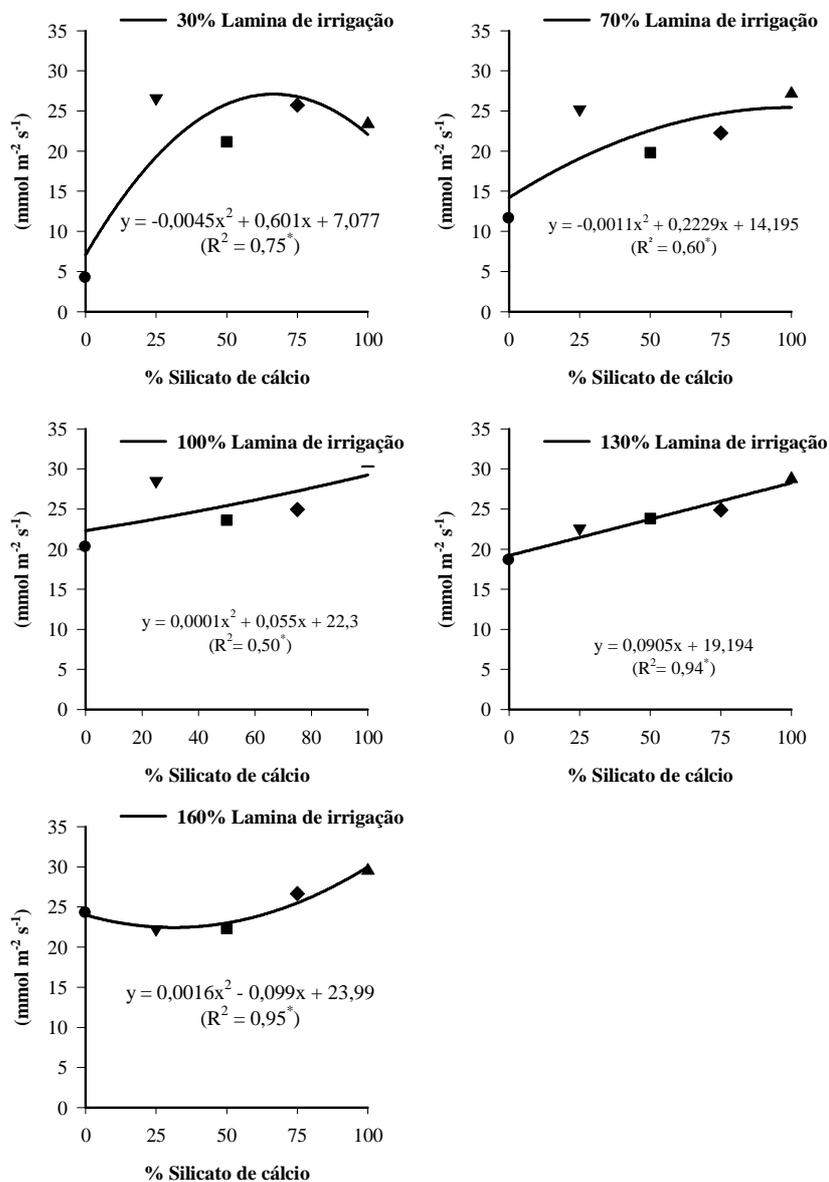


Gráfico 44 Taxa fotossintética nas folhas de milho em função das diferentes proporções de silicato de cálcio dentro de cada lamina de irrigação quantificado aos 30 dias após o plantio

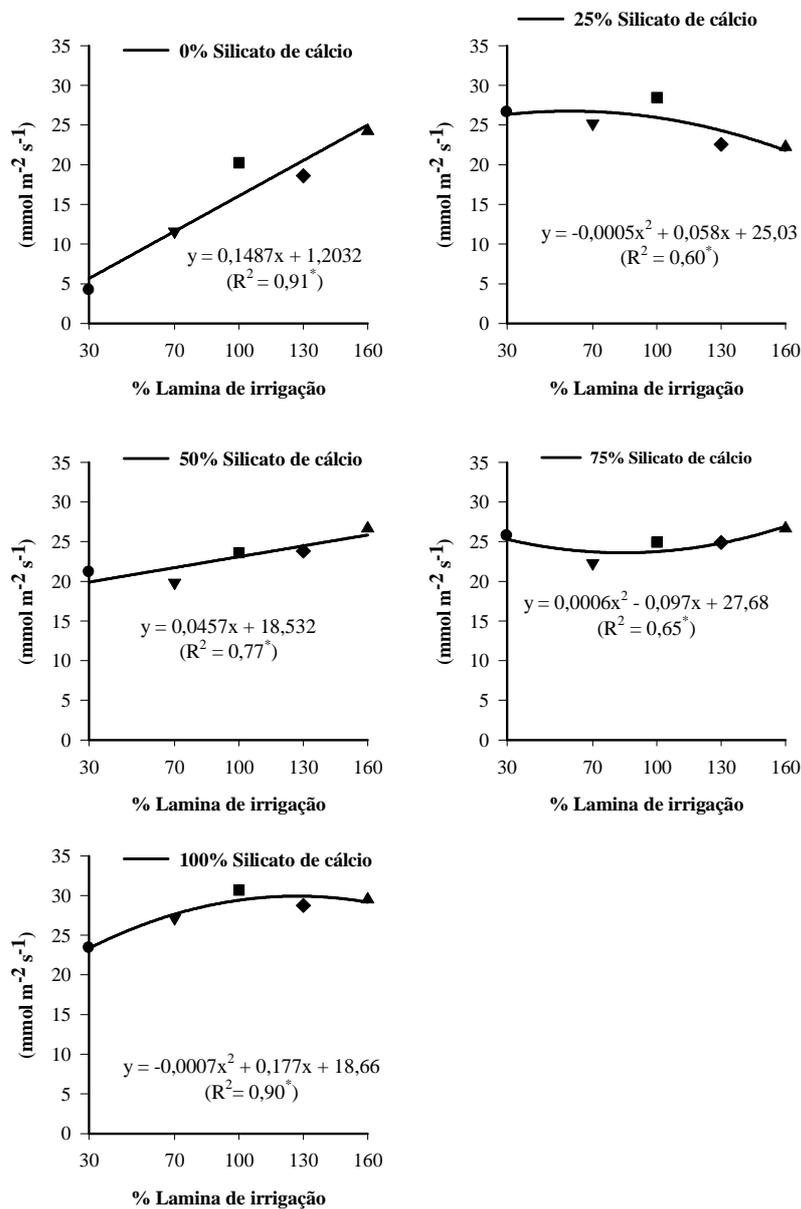


Gráfico 44 Taxa fotossintética nas folhas de milho em função das lâminas de irrigação dentro de diferentes proporções de silicato de cálcio, quantificado aos 30 dias após o plantio

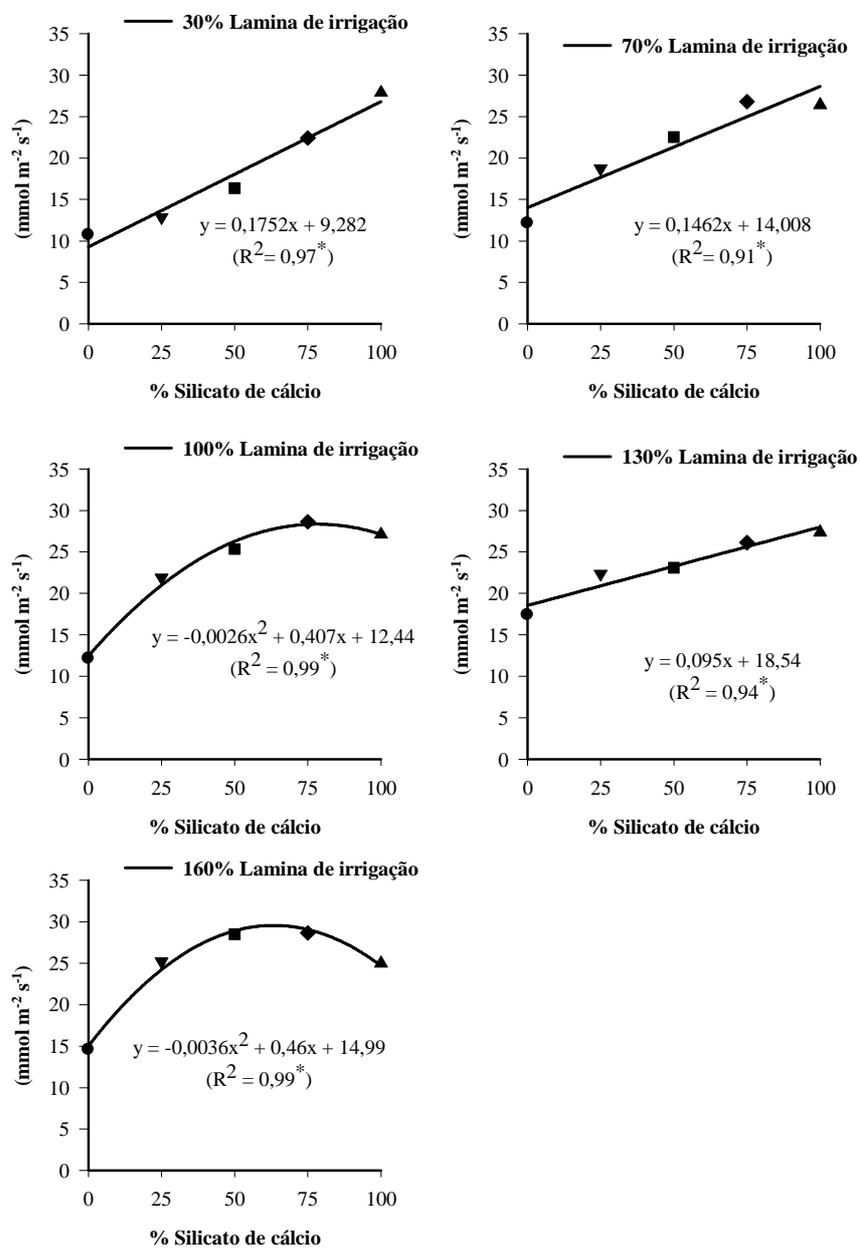


Gráfico 45 Taxa fotossintética nas folhas de milho em função de diferentes proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação, quantificado aos 75 dias após o plantio

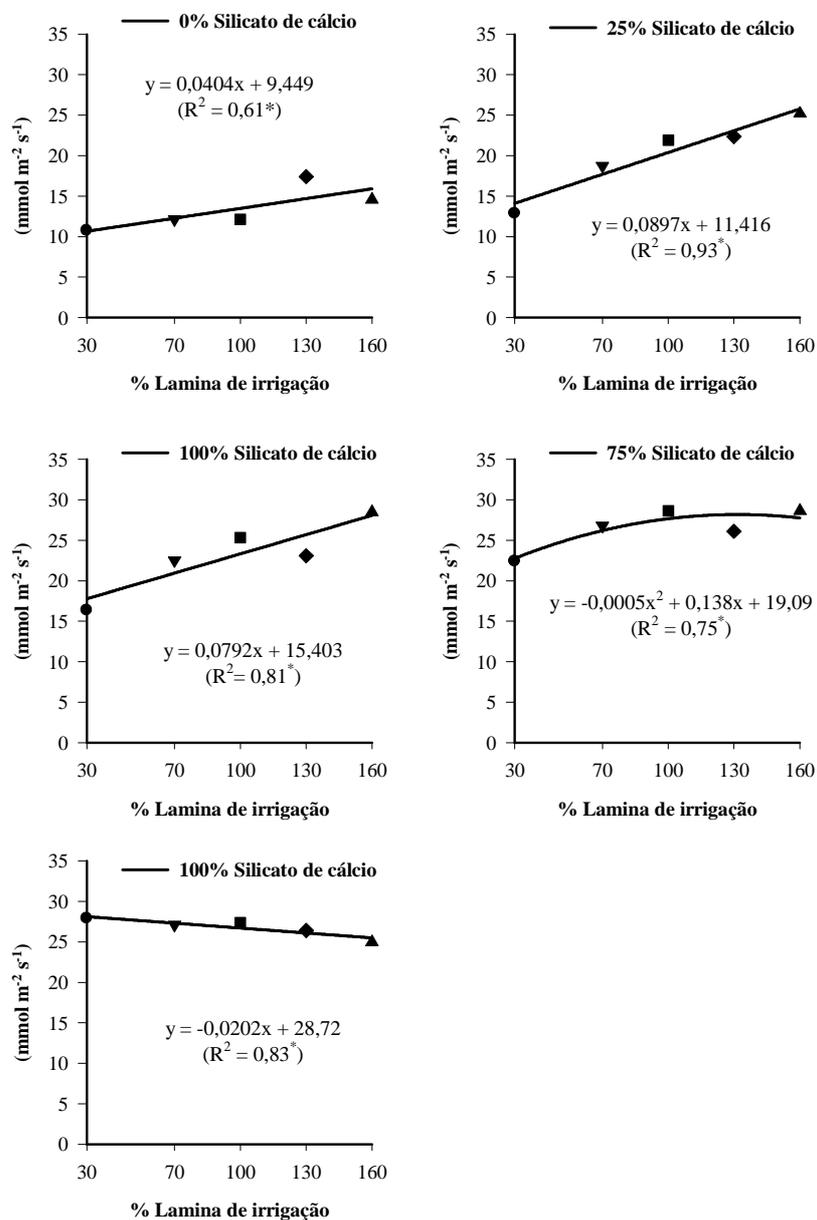


Gráfico 46 Taxa fotossintética nas folhas de milho em função das diferentes laminas de irrigação em cada proporção de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio

4.9.3 Transpiração nas folhas de milho

O Gráfico 47 apresenta o aumento máximo da transpiração nas folhas de milho, quantificada aos 30 dias após o plantio, até a proporção de 50% silicato de cálcio, em relação a cada diferente lâmina de irrigação. Esta queda na transpiração, para as maiores proporções de silicato de cálcio, pode estar relacionada ao maior potencial hídrico do xilema (Gráfico 42 e 43) e maior concentração de silício (Gráfico 37 e 38) o que pode ter resultado em maior equilíbrio da transpiração da planta. A proporção de 50% silicato de cálcio foi a combinação que proporcionou maior produção de milho para as menores aplicações de água no solo (Gráfico 26). Já para o Gráfico 48, notou-se aumento na transpiração nas folhas de milho com o aumento das diferentes lâminas de irrigação em relação a cada proporção de silicato de cálcio. Quando analisamos o tratamento controle (calcário puro), a transpiração foi de $2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em relação à aplicação de silicato puro, a transpiração foi de $7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para a menor aplicação de água (30% lamina recomendada). A transpiração nas plantas se processa, segundo as leis que regem a evaporação da água de superfícies úmidas. A água evapora de toda a superfície externa da planta e, também, de toda a superfície interna que está em contato com o ar. No interior dos órgãos do vegetal, o vapor de água origina-se das paredes das células e fica limitado pelos espaços intercelulares. Nos espaços intercelulares, a água passa da fase líquida para a fase gasosa e depois escapa para o exterior pelos estômatos. O circuito de água opera em função do estresse hídrico, ao mesmo tempo em que o nível de ácido abscísico aumenta, influenciando a osmorregulação das células fechadoras. Assim, a capacidade de abertura estomática diminui progressivamente e, sob estresse hídrico, os estômatos permanecem fechados, não mais respondendo. Um importante papel no fechamento estomático parece

ser executado pelo CO_2 citoplasmático, conjuntamente com o ácido abscísico (ABA).

O transporte de íons depende do abastecimento de energia (ATP) e é influenciado por substâncias endógenas. Dessa forma, a sensibilidade dos estômatos para a abertura e fechamento altera-se durante o curso do dia e de acordo com a atividade, o desenvolvimento e adaptação do vegetal (LARCHER, 2000). A taxa de transpiração tem um grande efeito no estatus hídrico das plantas, em diversos processos metabólicos e no crescimento e desenvolvimento das plantas (HALE; ORCUTT, 1987; MERVA, 1996). O estresse hídrico ocorre sempre quando a água disponível no solo reduzir a níveis que diminuem a absorção normal de água pelo sistema radicular das plantas e quando as condições atmosféricas forem favoráveis à perda contínua de vapor d'água por transpiração das plantas e evaporação direta da superfície do solo. Essa situação é verificada, quando há supressão parcial ou total de aplicação de água às plantas, em virtude da distribuição irregular das precipitações pluviais e ao manejo inadequado da água de irrigação (GOMIDE, JORDAN; SLACK, 1992).

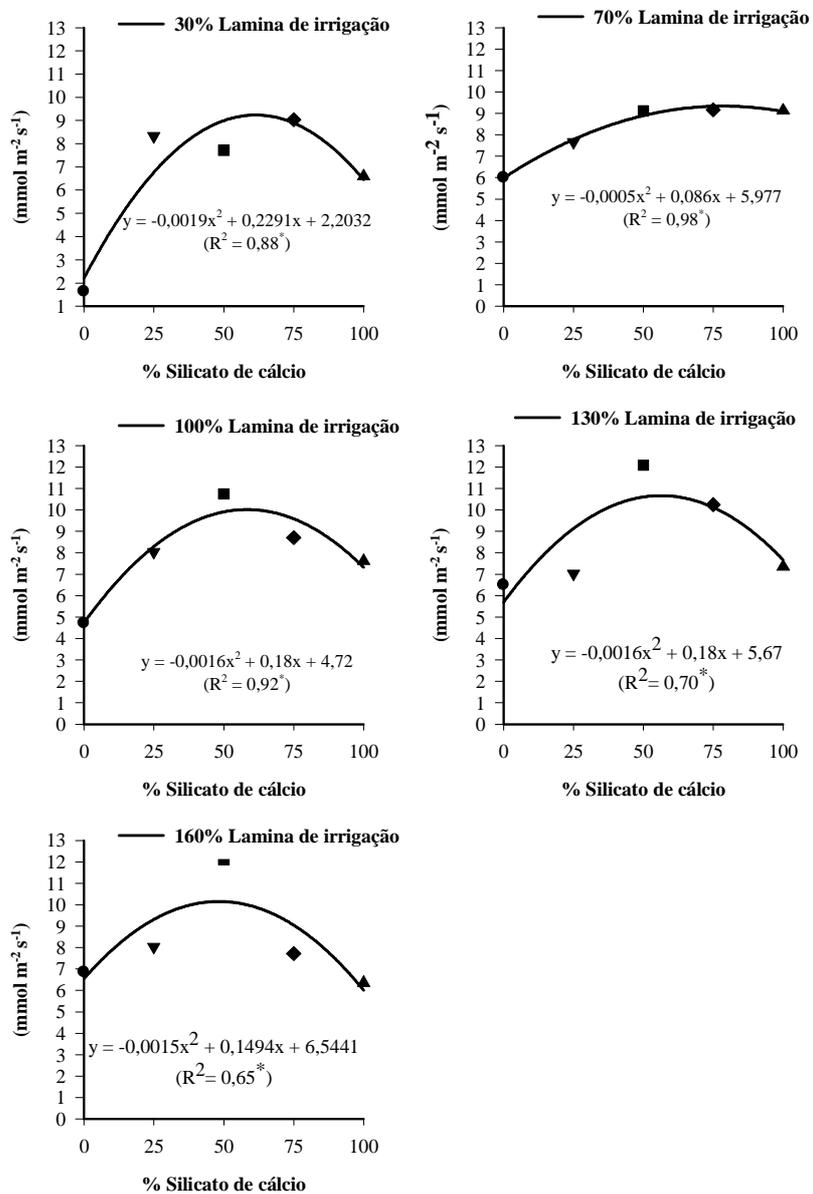


Gráfico 47 Transpiração em folhas de milho em função de diferentes proporções de silicato de cálcio, em cada lâmina de irrigação quantificado aos 30 dias após o plantio

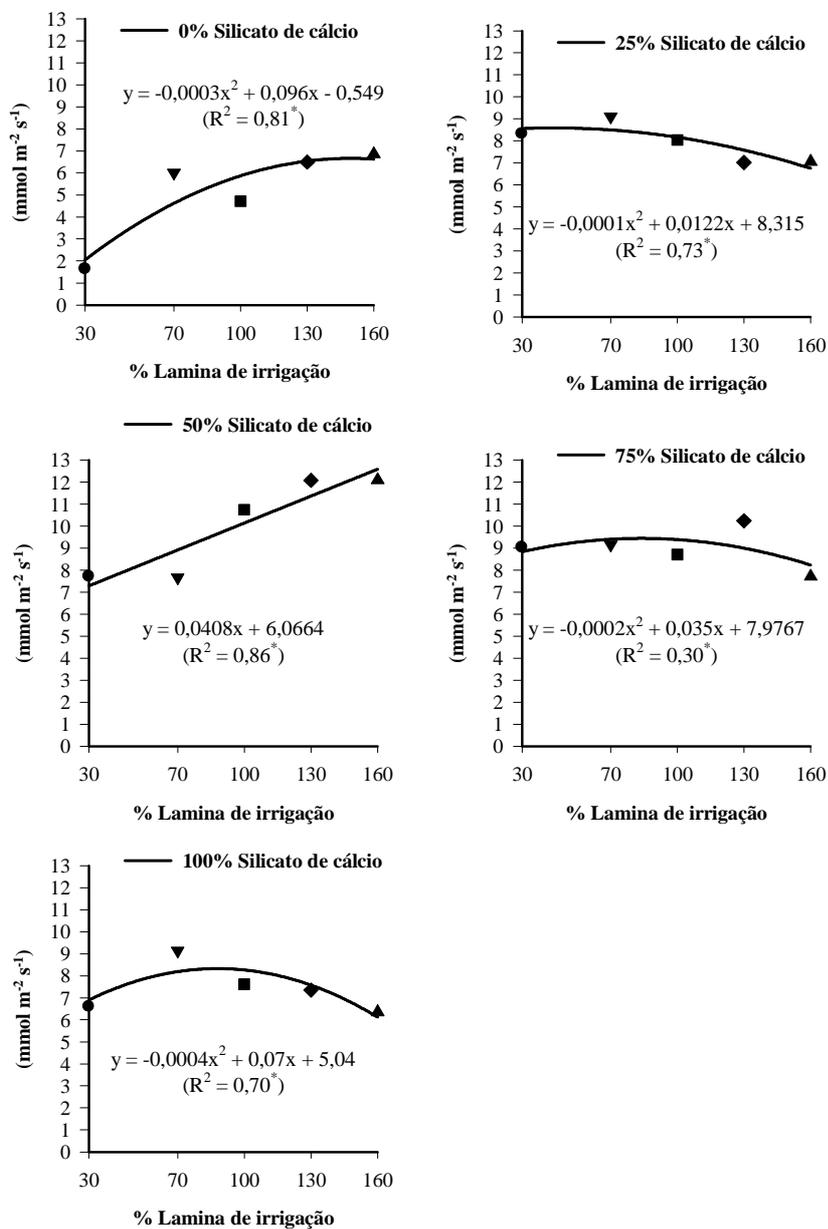


Gráfico 48 Transpiração em folhas de milho em função das diferentes laminas de irrigação em todas as proporções de silicato de cálcio quantificado aos 30 dias após o plantio

O Gráfico 49 apresenta o aumento da transpiração nas folhas de milho com o aumento das proporções de silicato de cálcio em relação a cada lamina de irrigação. Esta leitura da transpiração foi realizada aos 75 dias após o plantio, neste período, as plantas de milho estavam em estágio de produção. Notou-se que, para os tratamentos com aplicação de silicato puro, a transpiração foi superior ao tratamento controle. Já para a Gráfico 54, notou-se a mesma tendência de aumento da transpiração nas folhas de milho com o aumento da aplicação de água em relação a cada proporção de silicato de cálcio. Estes resultados estão de acordo com a altura de plantas de milho (Tabela 5) e número de folhas (Tabela 7). A determinação da taxa de transpiração das plantas pode ser realizada com medições automáticas de fluxo de circulação de seiva nos caules (sistema vascular: conjunto de vasos do xilema), por meio de métodos denominados de termoeletrônicos, que se baseiam na condição de estado de equilíbrio térmico, verificado após a aplicação do calor na forma de um pulso (COHEN et al., 1981; EDWARDS; WARWICK, 1984), de um aquecimento contínuo (CERMAK; KUCERA; PENKA, 1976) ou de um balanço de energia (PICKARD, 1973; SAKURATANI, 1984). Tais métodos requerem o conhecimento das propriedades térmicas do tecido vegetal do caule, isto é, calor específico, condutividade térmica e densidade. Inúmeras variáveis fisiológicas, tais como o nível de ácido abscísico, a fotossíntese líquida, a transpiração, a condutância estomática, dentre outras, são correlacionadas com o status de energia da água na planta e seus componentes, em nível celular, daí o interesse da avaliação dessa variável em estudos das relações hídricas das plantas (HSIAO, 1973). O controle de água na planta é realizado, principalmente, pelos estômatos, cuja condutância é modulada, em geral, pela diferença na pressão de vapor entre o ambiente e a planta e por sinalizadores endógenos, notadamente, o ácido abscísico (WENSUO et al., 1996). Os reguladores de crescimento endógenos, além de modularem a condutância estomática e, conseqüentemente,

a temperatura da planta, promovem alterações como o murchamento e o enrolamento das folhas. O déficit de água nos tecidos, causado pela excessiva demanda evaporativa ou pelo limitado suprimento de água no solo, afetam todos os aspectos do crescimento e desenvolvimento dos vegetais (KRIEG, 1993). Para a planta, a capacidade de abertura estomática influencia, sensivelmente, a taxa de desidratação. Quando o ambiente apresentar déficit hídrico, as plantas podem utilizar mecanismos de tolerância como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados. Com o déficit hídrico, os solutos da célula ficam concentrados, tornando mais negativo o seu potencial osmótico (PATAKAS et al., 2002). Uma das primeiras tentativas de manter o nível hídrico no interior da planta é o fechamento dos estômatos, porém, a consequência desse evento fisiológico é a restrição das trocas gasosas entre o interior da folha e a atmosfera, causando redução na assimilação de CO₂, utilizado no processo fotossintético (KRIEG, 1993). De acordo com Lopes et al. (1988), o déficit hídrico reduz o índice de troca de CO₂ e a sua condução para a folha, além de reduzir a concentração desse elemento nos espaços intercelulares. Após a interrupção do déficit hídrico, esses parâmetros tendem a voltar ao normal, porém não em sua plenitude, pois a velocidade de recuperação é reduzida. Segundo Mota (1983), a recuperação completa da fotossíntese é lenta quando a planta chega próximo ao ponto de murcha permanente, variando com a espécie vegetal, com o tipo de solo e com o método de aplicação da água de irrigação.

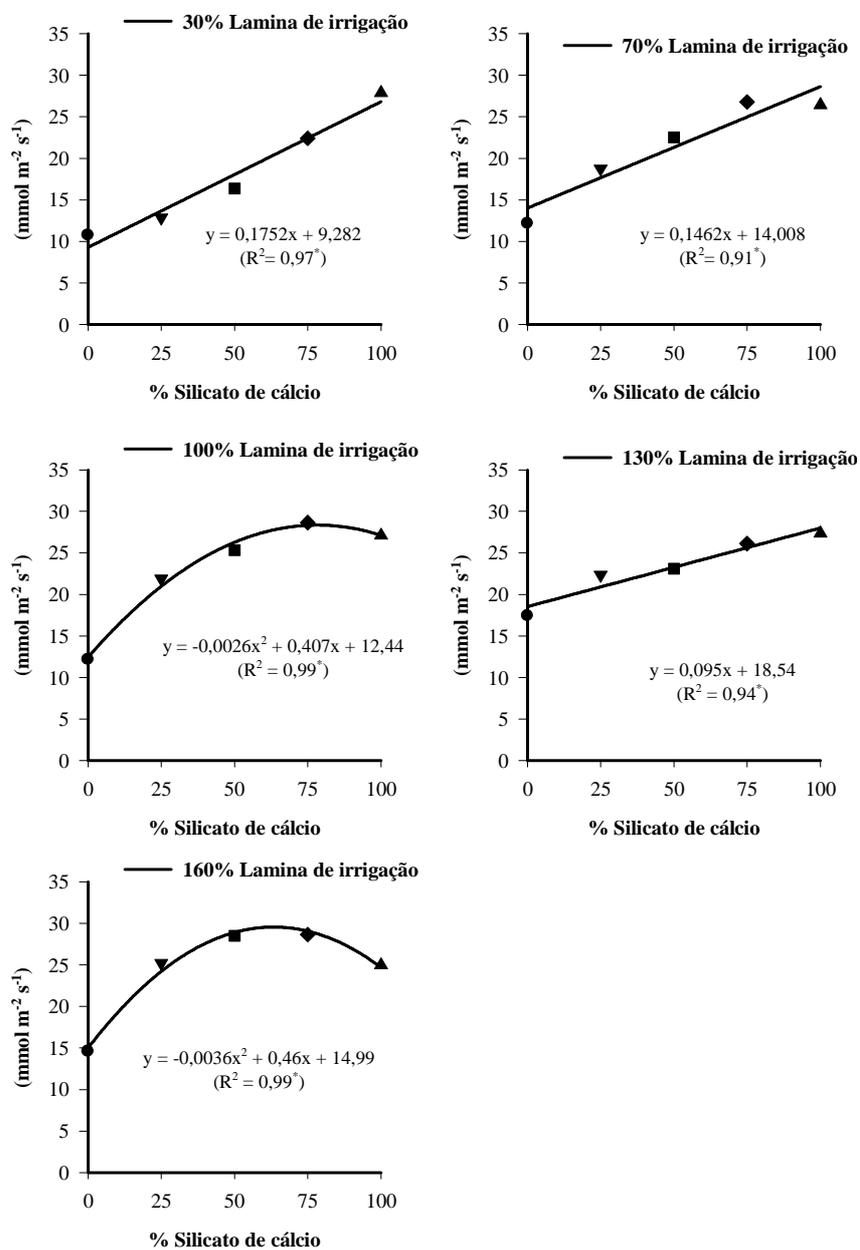


Gráfico 49 Transpiração em folhas de milho em função das proporções de silicato de cálcio dentro de cada lâmina de irrigação quantificado aos 75 dias após o plantio

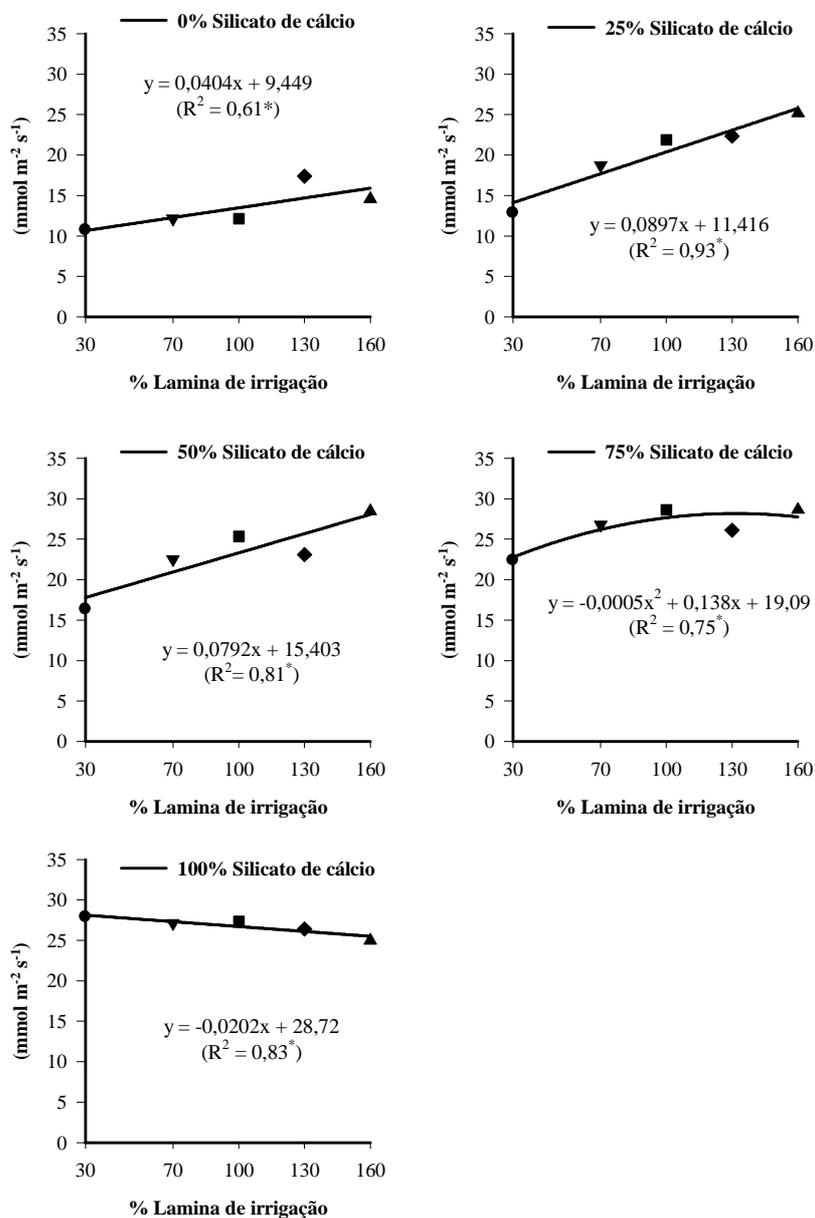


Gráfico 50 Transpiração em folhas de milho em função das diferentes laminas de irrigação dentro de proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio

4.10 Anatomia vegetal da folha do milho

4.10.1 Secções paradérmicas da seção abaxial

Para o número de estômatos e densidade estomática, na face abaxial da folha do milho, aumentou em relação ao aumento das proporções de silicato de cálcio para o efeito da menor aplicação de água 30% lâmina de irrigação (Gráfico 51 A e C). O tratamento com 100% silicato de cálcio foi superior para a aplicação da lâmina de irrigação considerada limitante para a cultura do milho. Notou-se que o uso de silicato de cálcio aumentou os estômatos nas folhas de milho o que, provavelmente, induziu aumento da taxa fotossintética (Gráficos 44, 45, 46 e 47). Com relação à proporção de 50% silicato de cálcio foi a que induziu maior número de estômatos para as aplicações 70 e 100% lâmina de irrigação, estas lâminas foram as que proporcionaram maior altura de plantas (Tabela 5) e produção de grãos de milho (Gráfico 26). Já para as aplicações em excesso 130 e 160% lâmina de irrigação, as proporções de 75 e 100% de silicato de cálcio foram as que produziram maior número de estômatos na face abaxial da folha do milho. Para o número de células da epiderme, as proporções de 25 e 50% silicato de cálcio foram superiores até a aplicação de 30% lâmina de irrigação (Gráfico 51 B). No entanto, para 0 e 50% silicato de cálcio foram as proporções com produção superior de células da epiderme para a o efeito 70% lâmina de irrigação. Já para a aplicação da lâmina recomendada à proporção de 75% silicato de cálcio foi superior. Contudo, para as aplicações em excesso 130 e 160% lâmina de irrigação, as proporções superiores foram para 0, 25, 50 e 75% silicato de cálcio. Um dado muito interessante foi para a aplicação de 100% silicato de cálcio que não demonstrou tendência de queda e aumento das células da epiderme, notando tendência de estabilidade para as proporções de silicato de cálcio em relação ao efeito das lâminas de irrigação. Uma das funções da

epiderme é a proteção contra a dessecação o que se observa nos dados encontrados no trabalho para as menores aplicações das lâminas de irrigação (Figuras 42 e 43). A parede celular externa produz um revestimento que permite à planta dificultar a transpiração, diretamente, por meio das células epidérmicas. Outra função importante é a de realização de trocas gasosas, que acontecem nos estômatos e são de fundamental importância para a liberação de O₂ e a captação de CO₂ nas folhas ou mesmo em outras partes do vegetal (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). O Gráfico 51 (C) apresenta densidade estomática na face abaxial da folha, as diferentes proporções se comportaram de maneira distinta. Nota-se que para a menor aplicação de água tratamento considerado estressante, as proporções de 50, 75 e 100% silicato de cálcio foram superiores. Estes resultados concordam com a taxa fotossintética (Gráficos 44, 45, 46 e 47). Com o aumento da aplicação de água ao solo 70 e 100% lâmina de irrigação, a proporção de 50% silicato de cálcio foi superior para a variável densidade estomática. Já para o excesso de água 130 e 160% lâmina de irrigação, as proporções de 75 e 100% silicato de cálcio foram superiores na variável citada anteriormente. Também foi observado que o número de estômatos da face abaxial foi superior ao da face adaxial (Gráfico 55 A), nesse caso esta folha é denominada de anfiestomática. Estes resultados concordam. Silva et al. (2000) e Velini e Trindade (1992) relatam que, na maioria destas plantas, os estômatos se localizam na face abaxial das folhas (hipoestomáticas), confirmando os resultados observados por Meyer et al. (1973), os quais, realizando contagens do número de estômatos em 39 espécies, verificaram que 16 eram anfiestomáticas e o restante, hipoestomáticas. Também observaram que, nas anfiestomáticas, o número de estômatos na face adaxial era normalmente inferior ao da face abaxial. Para o índice estomático não houve diferença significativa para o efeito das diferentes lâminas sem função das proporções de silicato de cálcio. Os dados encontrados no trabalho demonstram que todos os estômatos produzidos

diferenciaram (Gráfico 51 D). Provavelmente o feito do silício na diferenciação dos estômatos pode ser relacionado à sua incorporação nas paredes celulares, durante a ontogênese, promovendo alguma diminuição nas taxas mitóticas da protoderme, atuando, principalmente, nas células precursoras de estômatos. Estes resultados concordam com Castro, Pereira e Paiva (2009) os quais o índice estomático representa o investimento da planta na produção de estômatos em relação ao total de células epidérmicas. Variações no comportamento estomático, tanto em relação à densidade quanto ao tamanho dos estômatos, é uma característica muito variável em plantas, em função do ambiente onde se encontram e ocorre, frequentemente, em plantas submetidas a diferentes estresses (ALVES; GIUSTI; DOMINGOS, 2001; BENNET et al. 1992; SACHS; NOVOPLANSKY; KAGAN, 1993; MELO et al., 2004; CASTRO et al., 2005). Diminuição no tamanho dos estômatos é um evento reconhecidamente importante na regulação das trocas gasosas, uma vez que folhas com estômatos menores apresentam maior eficiência no uso da água por apresentarem um menor tamanho dos poros estomáticos, condicionando, assim, uma menor perda de água por transpiração. Bidwell (1964) já havia constatado que a diminuição no tamanho da abertura estomática apresentava maior efeito sobre a difusão de água do que sobre a difusão de CO₂, podendo, desse modo, manter o influxo de CO₂ necessário à fotossíntese e uma menor perda de água por transpiração. Quando a ocorrência do déficit hídrico é rápida, os mecanismos morfofisiológicos são severamente afetados e a planta necessita adaptar-se à nova situação, de forma rápida. Desta forma, plantas conduzidas em condições de irrigação, normalmente, apresentam menos resistência a situações de déficit hídrico no solo; já em plantas submetidas ao déficit hídrico gradual ou à deficiência de água no solo, no início do seu ciclo, mais facilmente ocorre a adaptação das plantas. A tolerância da planta ao déficit hídrico parece ser um importante mecanismo de resistência, para a manutenção do processo produtivo

em condições de baixa disponibilidade de água às plantas. Korner, Scheel e Bauer (1979) observaram que, apesar das poáceas C_4 terem uma capacidade fotossintética maior que as C_3 , elas apresentam similaridade na condutância. Um ponto crítico, para a justificativa dessa resposta e que, ainda, não está totalmente esclarecido é o conhecimento amplo dos complexos fatores que levam à regulação estomática nas plantas C_3 e C_4 (JONES, 1988).

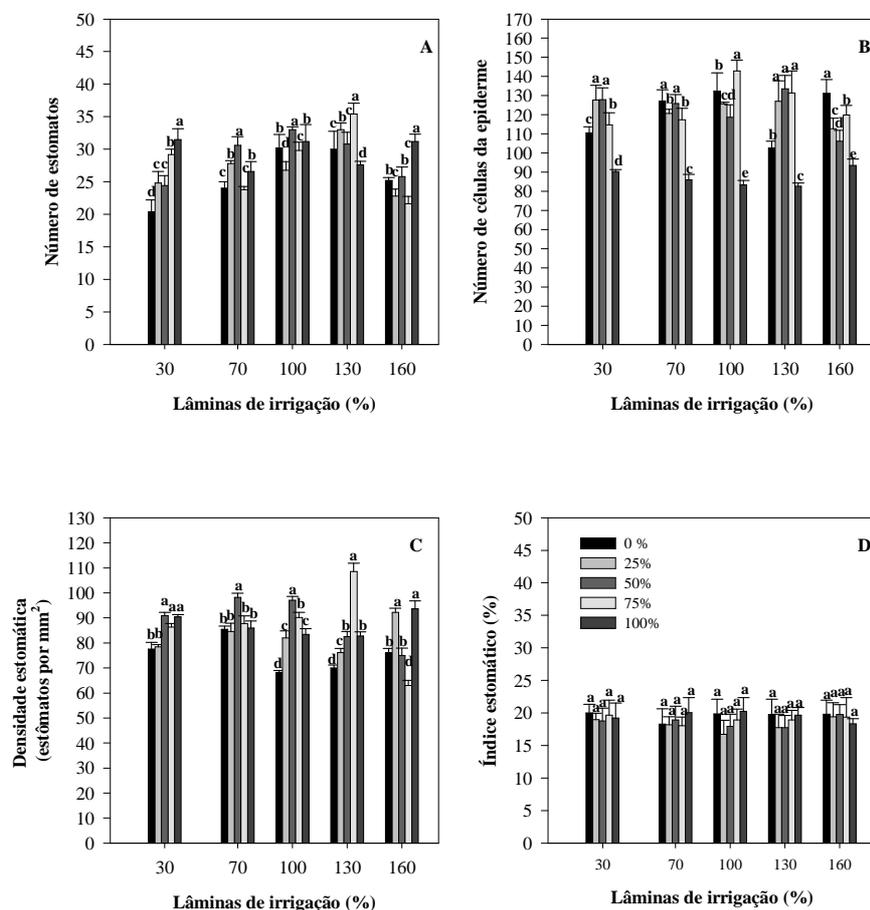


Gráfico 51 Cortes paradérmicos da seção abaxial na folha de milho número de estômatos (A), número de células da epiderme (B), densidade estomática (C), índice estomático em função das diferentes lâminas de irrigação dentro das proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio

4.10.2 Seções paradérmicos da seção adaxial na folha de milho

O Gráfico 52 (A e B) apresenta o aumento no número de estômatos e densidade estomática na face adaxial da folha do milho dentro de cada lâmina de irrigação em relação às proporções de silicato de cálcio. O tratamento com a

aplicação de silicato puro foi superior na produção de estômatos para as menores laminas de irrigação. Está é uma característica interessante, porque quanto maior o número de estômatos maior atividade fotossintética (Gráfico 44, 45, 46 e 47) resultando na maior produção de matéria seca e produção de grãos no milho (Gráfico 26) para 30 e 70% lâmina de irrigação. Dessa forma, menos estômatos se diferenciam na face adaxial (Gráfico 52 A e B) das folhas em comparação com a face abaxial (Gráfico 51 A e B). A face abaxial fica mais protegida contra o excesso de radiação, temperatura o que auxilia na diminuição da transpiração excessiva. O aumento da fotossíntese e transpiração tem relação com o aumento da densidade estomática na face abaxial, contudo, a presença do silicato promoveu um ajuste morfológico nas plantas, que manteve as taxas de transpiração em níveis não prejudiciais por serem deslocados para a face abaxial. As alterações anatômicas decorrentes da baixa disponibilidade de água no meio, geralmente, estão envolvidas na proteção das plantas contra a perda de água para o ambiente e dessecação de células corticais assim como na manutenção da condução de água no xilema (VASELLATI et al., 2001). Estudos de ecofisiologia são concentrados nas alterações de abertura estomática que, em condições de déficit hídrico, tendem a agir no sentido de minimizar as perdas de água por transpiração (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003). O número de células epidérmicas foram superiores para a adição de silicato de cálcio quando em cada lamina de irrigação (Gráfico 56 D). A redução da transpiração pode ser associada com uma maior funcionalidade estomática, pois os estômatos se tornam mais elípticos (BATISTA et al., 2010; CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009; SOUZA et al., 2010), a redução da transpiração pode, ainda, ser associada com uma maior DE que, frequentemente, é observada em condições de maior quantidade de radiação e de menor disponibilidade de água (BOEGER; WISNIEWSKI, 2003; CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009; SANTIAGO et al., 2001; SOUZA et al., 2007). Dessa forma, uma maior densidade estomática pode permitir uma abertura em um

espaço de tempo menor, permitindo uma captação adequada de CO₂ e reduzindo o tempo em que esses estômatos ficam abertos, reduzindo, conseqüentemente, a transpiração, permitindo uma melhor adaptação do genótipo.

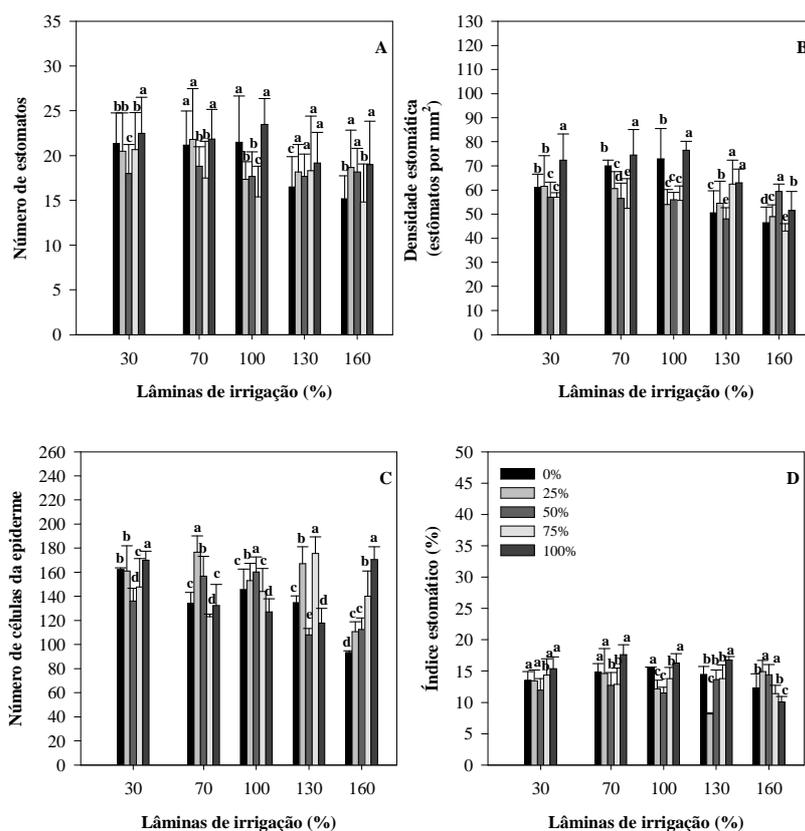


Gráfico 52 Cortes paradérmicos da seção adaxial na folha de milho número de estômatos (A), número de células da epiderme (B), densidade estomática (C), índice estomático em função das diferentes lâminas de irrigação nas proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio

4.10.3 Secções transversais da seção abaxial na folha de milho

O Gráfico 53 (A, B, C e D) está apresentado o aumento espessura da epiderme na face abaxial, adaxial, mesofilo e distância entre feixes dentro de cada lâmina de irrigação quanto à adição de silicato de cálcio. A adição de silício beneficiou a cultura do milho, observando aumento da taxa fotossintética (Gráficos 44, 45, 46 e 47), aumento do potencial hídrico da folha (Gráficos 42 e 43), transpiração (Gráficos 48, 49, 50 e 51) e produção de grãos (Gráfico 26). A cutícula recobre todas as células da epiderme da planta e atua como interface entre o corpo da planta e o ambiente, realizando a proteção e a prevenção da perda de água dos tecidos vegetais (BUKOVAC et al., 1990). A plasticidade anatômica, em algumas espécies, desenvolve mudanças na espessura de tecidos do limbo foliar que possibilitam uma melhor adaptabilidade a diferentes condições de estresse, como observado por Alves, Giusti e Domingos (2001). A epiderme celular, tanto em folha quanto nas raízes, é um tecido bastante responsivo às alterações da condição do ambiente. Segundo Carlquist (1988) e Alves e Angyalloss-Alfonso (2000), os fatores ambientais afetam as dimensões e até mesmo o arranjo dos elementos vasculares, na tentativa de garantir um aumento na segurança do transporte quando a planta está sujeita a algum tipo de estresse.

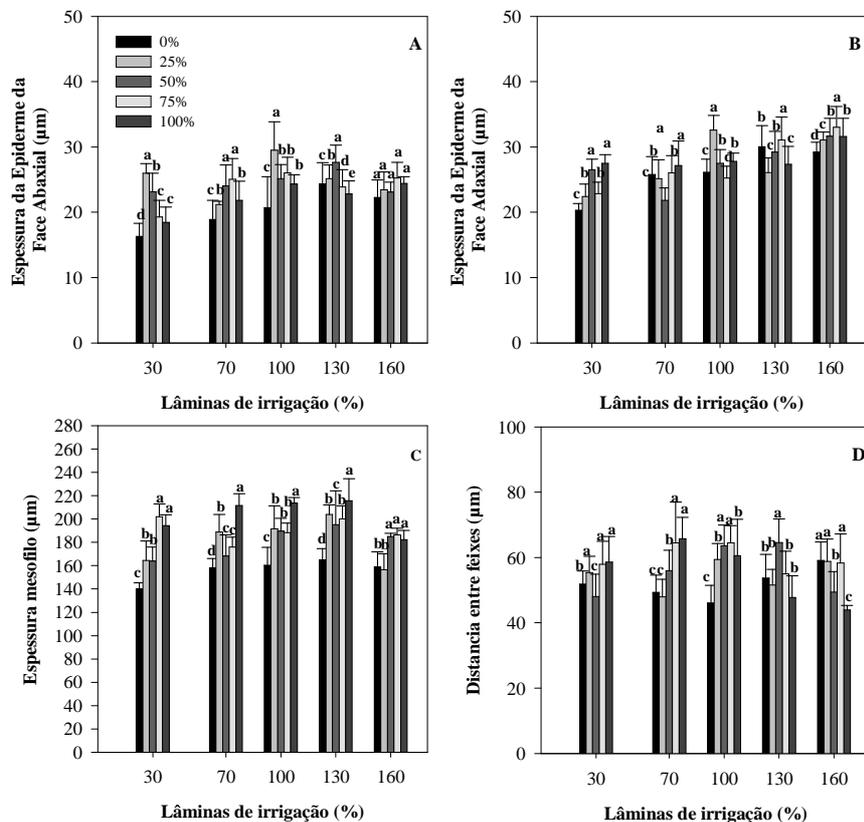


Gráfico 53 Corte transversal da seção na folha de milho e espessura da epiderme da face abaxial (A), espessura da epiderme da face adaxial (B), espessura do mesofilo (C), distância entre feixes (D) em função das diferentes lâminas de irrigação dentro das proporções de silicato de cálcio quantificado aos 75 dias após o plantio

O Gráfico 54 (E, F e G) apresenta o aumento do diâmetro equatorial polar de células buliformes da epiderme e fibras dentro de cada lâmina de irrigação em cada proporção de silício. De acordo com Esau (2000), as células buliformes atuam como células motoras, tanto no dobramento quanto no enrolamento das folhas. O diâmetro polar dos estômatos está diretamente relacionado com o tamanho dessas estruturas (CASTRO; PEREIRA; PAIVA,

2009) e características ambientais são diretamente relacionadas com o diâmetro polar, que pode aumentar em resposta à deficiência hídrica (BATISTA et al., 2010; GRISI et al., 2008).

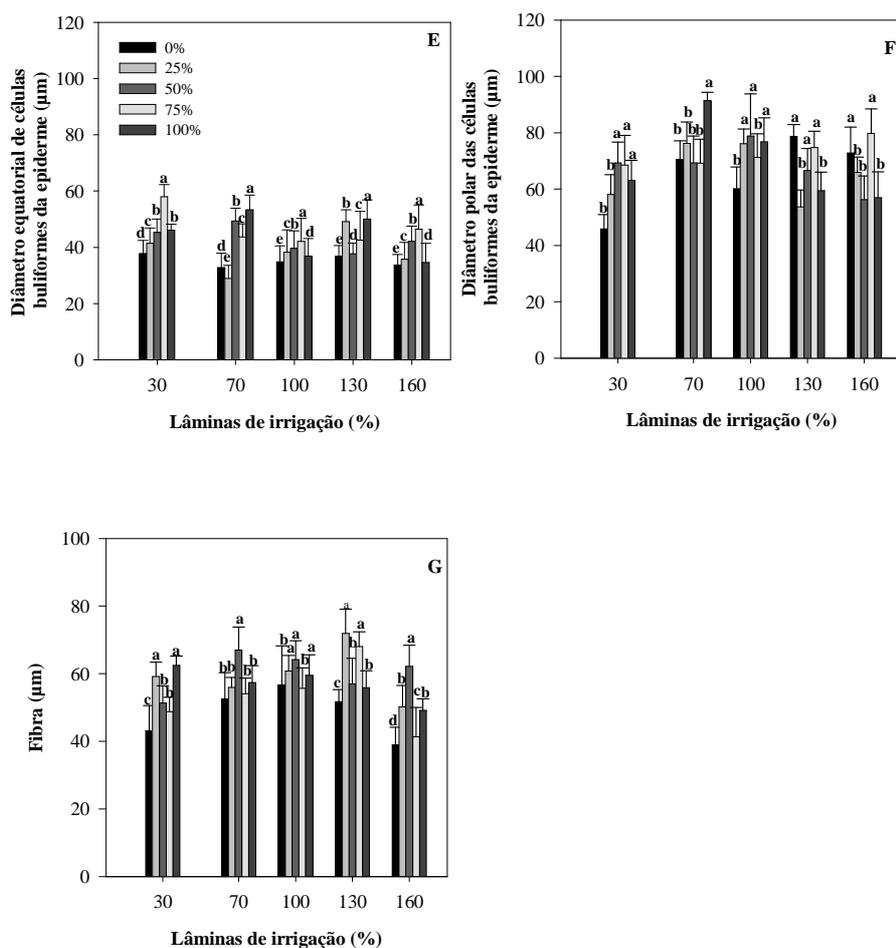


Gráfico 54 Corte transversal da seção da folha de milho diâmetro equatorial de células buliformes da epiderme (E), diâmetro polar de células buliformes da epiderme (F), fibras (G) em função das diferentes lâminas de irrigação dentro das proporções de silicato de cálcio quantificada aos 75 dias após o plantio

4.11 Eficiência no Uso da Água (EUA)

4.11.1 Eficiência no uso da água fisiológico

O Gráfico 55 apresenta EUA fisiológica nas folhas das plantas de milho, é influenciada, significativamente, pela interação das lâminas de irrigação e proporções de silicato de cálcio aplicadas ao solo. Os desdobramentos dessa interação estão representados no (Gráfico 55 A, B, C e D).

Para a EUA fisiológica (Gráfico 55 A) nas diferentes lâminas de irrigação em cada proporção de silicato de cálcio apresentou taxa da EUA superior para o tratamento com silicato puro. Estes resultados estão associados à maior fotossíntese (Gráficos 44, 45, 46 e 47), em todas as proporções de silicato de cálcio, em relação às lâminas de irrigação, na avaliação das plantas aos 30 dias após o plantio. No período em que foram quantificadas as leituras, as plantas estavam no estágio vegetativo. Os dados apresentados revelam importantes estratégias para o EUA no manejo da cultura do milho. Nota-se Gráfico 55 (A) que a proporção de 100% de silicato de cálcio foi a melhor associação em relação à aplicação as diferentes lâminas de irrigação. Esta maior eficiência está relacionada à maior relação da atividade fotossintética (Gráficos 44, 45, 46 e 47 e transpiração (Gráficos 48, 49, 50 e 51). No entanto, a proporção de 50% silicato de cálcio apresentou comportamento indiferente ao aumento das lâminas de irrigação. Para o desdobramento das lâminas de irrigação em relação às proporções de silicato apresentada no Gráfico 55 (B), cuja proporção de 50% silicato de cálcio foi mais eficiente, foi a associação que proporcionou maior produção de grãos (Tabela 26) para as proporções de 30 e 70% de silicato de cálcio. Já para a quantificação da EUA, aos 75 dias após o plantio, a proporção de 100% de silicato de cálcio foi superior em relação às lâminas de irrigação (Gráfico 55 C e D). A utilização de indicadores da EUA é

uma das formas de se analisar a resposta dos cultivos às diferentes condições de disponibilidade de água, pois relaciona a produção de biomassa seca ou a produção comercial com a quantidade de água aplicada ou evapotranspirada pela cultura (LIU; STUZEL, 2004; PUPPALA et al., 2005). Calvache et al. (1997) citam que o uso eficiente da água pelas culturas agrícolas depende, sobretudo, das condições físicas do solo, das condições atmosféricas, do estado nutricional das plantas, de fatores fisiológicos, da natureza genética e do seu estágio de desenvolvimento. Segundo Coelho, Coelho Filho e Oliveira, (2005), a otimização dessa eficiência, para a sustentabilidade dos recursos hídricos, pode ser alcançada de duas formas: considerando as curvas de respostas físicas da produtividade e a eficiência de uso da água (EUA), onde a EUA é calculada pela razão entre a produtividade e a quantidade de água aplicada na cultura; e a outra forma é criando meios de reduzir a lâmina aplicada, trabalhando, favoravelmente, os fatores que reduzem a evapotranspiração da cultura (ETc), basicamente, pelo aumento da resistência estomática com práticas de sombreamento, isto é, a resistência de abertura dos estômatos nas folhas, ou pela resistência aerodinâmica das plantas, por meio da utilização de quebra ventos, que é a resistência ao transporte de massas de ar na vegetação.

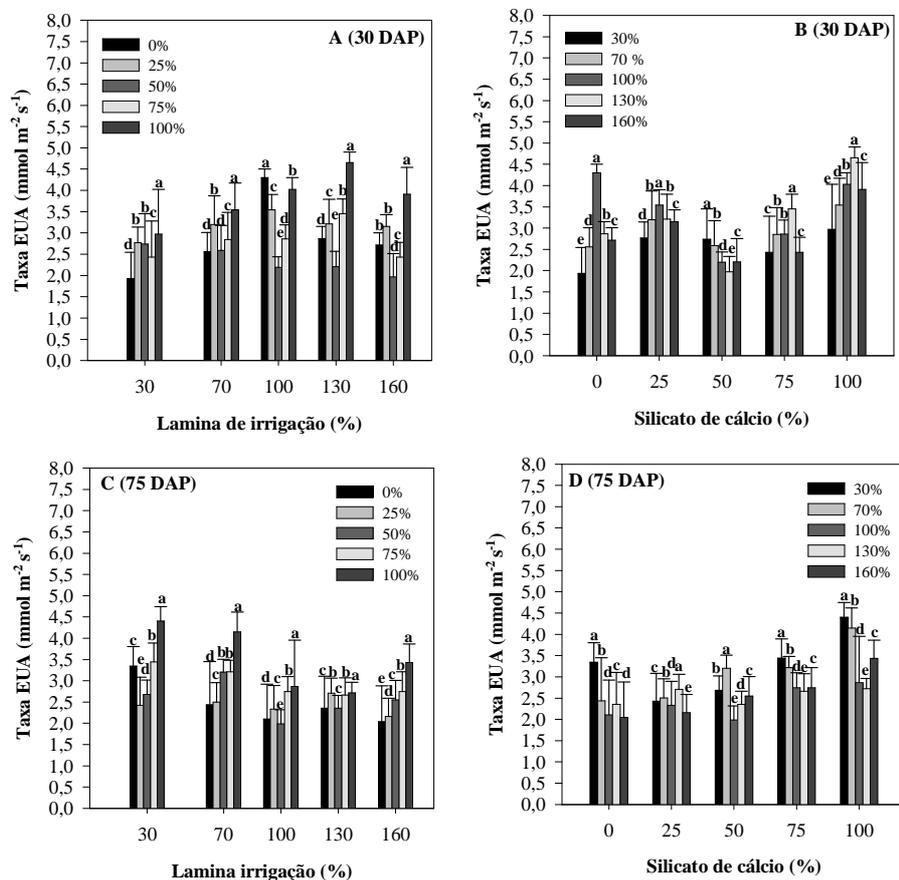


Gráfico 55 Eficiência do uso da água aos 30 (A e B) e 70 (C e D) dias após o plantio em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação

4.11.2 Eficiência do uso da água agrônômico

O Gráfico 56 apresenta a EUA para produção de grãos de milho em relação às proporções de silicato de cálcio e das diferentes lâminas de irrigação. Para a EUA notou-se que as maiores taxas foram para as proporções de 50, 50, 25, 25 e 50% silicato de cálcio, em relação ao efeito do aumento das lâminas de

irrigação (Gráfico 56 A). Já para o desdobramento das médias, as aplicações de 100, 100, 30, 30, 30% lâmina de irrigação foram superiores para a interação das proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% silicato de cálcio (Gráfico 56 B). Os dados encontrados no presente trabalho revelam importantes estratégias para amenizar o estresse hídrico usando proporções de silicato de cálcio. O Gráfico 56 (C e D) apresenta a EUA para a massa de matéria seca das folhas para as proporções de silicato de cálcio em relação às diferentes lâminas de irrigação. Pelo Gráfico 56 (C) notou-se que a EUA foi menor para o tratamento controle na proporção de 0% silicato de cálcio em relação às lâminas de irrigação. Contudo, os tratamentos que receberam proporções de 25, 50, 75 e 100% silicato de cálcio proporcionaram melhor eficiência no uso da água. A EUA das folhas (Gráfico 56 D) diminuiu com o aumento das lâminas de irrigação em relação às proporções de silicato de cálcio, o que representa maior eficiência com o incremento das lâminas de irrigação. Estes dados concordam com Souza et al. (2011) no caso do milho. Verificaram que a eficiência do uso de água (EUA) aumentou com o incremento da lâmina de água aplicada, sendo a maior EUA obtida com a lâmina de 125%. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato da cultura do milho ter maior resposta produtiva ao incremento da lâmina de água. A EUA é uma média complexa e determinante da produtividade de grãos, principalmente, em condições de déficit hídrico (BLUM, 2005).

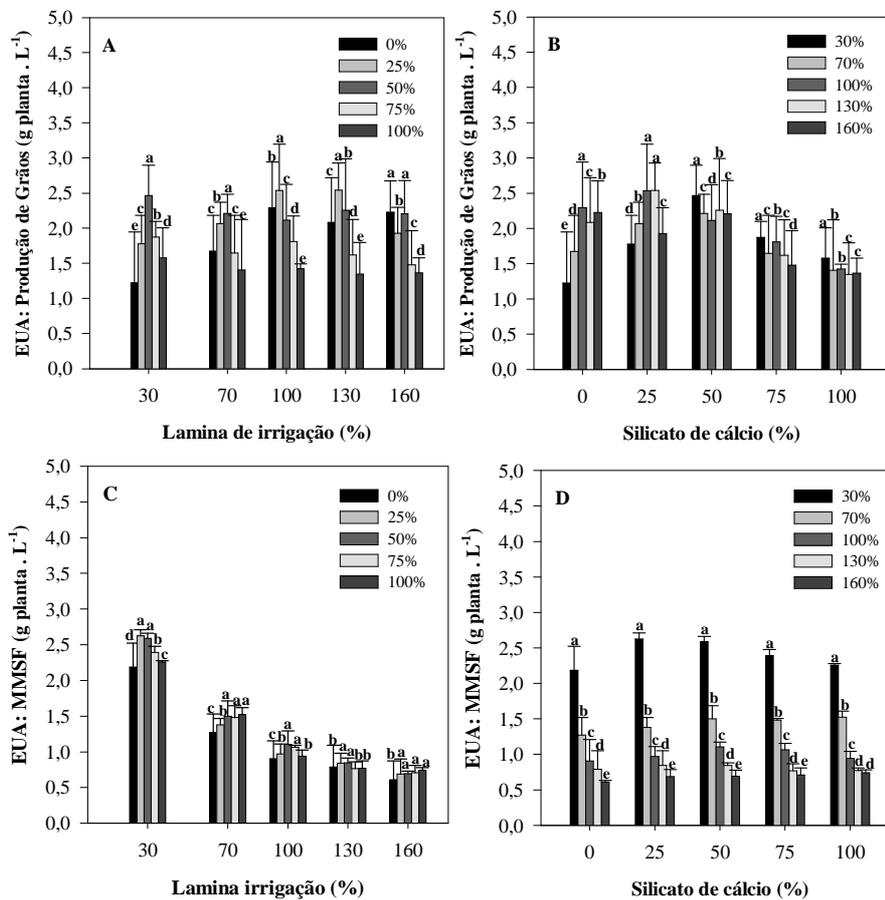


Gráfico 56 Eficiência do uso da água para produção de grãos (A e B) e massa de matéria seca (C e D) em relação às diferentes proporções % silicato de cálcio e diferentes lâminas de irrigação

5 CONCLUSÕES

O monitoramento do potencial matricial e da condutividade elétrica confirmou que as lâminas de irrigação empregadas condicionaram ambientes bem contrastantes para o desenvolvimento das plantas de milho durante a condução do experimento.

Pelas avaliações agronômicas, verificou-se que o crescimento e o desenvolvimento das plantas de milho foram afetados pelos tratamentos apenas na presença das menores aplicações de água ao solo.

A absorção e acumulação de Ca nas diversas partes na planta de milho decresceram com o aumento da proporção de silicato de cálcio no corretivo.

Não se observaram tendências claras da participação do silício nas concentrações de macro e micronutriente nas diferentes partes da planta de milho.

O silício promoveu alterações na atividade fisiológica e na anatomia das folhas de milho nas diferentes lâminas de irrigação.

Confirmando a premissa do trabalho, verificou-se que, nas menores lâminas de irrigação, a produção das plantas de milho acompanhou o aumento do silicato de cálcio no corretivo até a proporção 50%.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 1992. 62 p. (Boletim técnico, 6).
- ALVES, E. S.; ANGYALLOSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood of some Brazilian species: Growth rings and vessels. **International Association of Wood, Anatomists Journal**, Utrecht, v. 21, p. 3-30, 2000.
- ALVES, E. S.; GIUSTI, P. M.; DOMINGOS, M. Anatomic studies on *Trandescantia* hibrid clone 4430 leaves: changes caused by urban air pollution. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 24, p. 561-566, 2001.
- ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: FEALQ, 2002. 272 p.
- ASCH, F.; DINGKUHN, M.; DORFFING, K. Salinity increases CO₂ assimilation but reduces growth in field grown irrigated rice. **Plant Soil**, The Hague, v. 218, n. 1/2, p. 1-10, 2000.
- ASSAD, E.; PINTO, H. S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: EMBRAPA-CEPAGRI, 2008. 82 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. PNBR. 12:02.08-022: **Requisitos mínimos para elaboração de projeto de sistema de irrigação localizada**. São Paulo, 1986. 18 p.
- BÄNZINGER, M. et al. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize**. México: CIMMYT, 2000. 68 p.

BANZIGER, M.; EDMEADES, G. O.; LAFITTE, H. R. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 75, p. 223-233, 2002.

BALASTRA, M. L. F. et al. Effects of silica level on some properties of *Oriza sativa* straw an hult. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 67, n. 8, p. 2356-2363, 1989.

BARUCH, Z.; MÉRIDA, T. Effects of drought and flooding on root anatomy in four tropical forage grasses. **International Journal the Plant Science**, Chicago, v. 156, p. 514-521, 1995.

BATISTA, C. U. N. et al. Tolerância à inundaç o de *Cecropia pachystachya* Trec. (Cecropiaceae): aspectos ecofisiológicos e morfoanatômicos. **Acta Botanica Brasilica**, Porto Alegre, v. 22, p. 91-98, 2008.

BATISTA, L. A. et al. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agron mica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.

BENNETT, J. P. et al. Relationships between leaf anatomy and ozone sensitivity of *Fraxinus pensylvanica* March. and *Prunus serotina* Ehrh. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 32, p. 33-41, 1992.

BERGONCI, J. I. et al. Condutância foliar como um indicador de déficit hídrico em milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria v. 8, n. 1, p. 43-48, 2000.

BERGONCI, J. I. et al. Eficiência da irriga o em rendimento de gr os e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 949-956, 2001.

BERGONCI, J. I. et al. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1531-1540, 2000.

BERGONCI, J. I.; PEREIRA, P. G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.

BIDWELL, R. G. S. Protein synthesis and turn over in cultured plant tissue: source of carbon jofr and fate of protein breakdown products. **Nature**, London, v. 203, p. 367-373, 1964.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential-are they compatible, dissonante, or mutually exclusive. **Australian Journal of Agriculture Research**, Victoria, n. 56, p. 1156-1168, 2005.

BOEGER, M. R. T.; WISNIEWSKI, C. Comparação da morfologia foliar de espécies arbóreas de três estádios sucessionais distintos de floresta ombrófila densa (Floresta Atlântica) no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 61-72, 2003.

BRALTS, V. F.; KESNER, C. Drip irrigation field uniformity estimation. Transactions of the ASAE, ST. **Joseph**, Saint Joseph, v. 24, n. 5, p. 1369-1374, 1983.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normas climatológicas 1965-1990**. Brasília, 1992. 84 p.

BRUCE, W. B.; EDMEADES, G. O.; BARKER, T. C. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 53, p. 13- 25, 2002.

BUKOVAC, M. J. et al. Sorption of organic compounds by plant cuticles. **Weed Science**, Champaign, v. 38, n. 3, p. 289-298, 1990.

BULL, L.T. **Influência da relação K/(Ca + Mg) do solo na produção de matéria seca e na absorção de potássio por gramínea e leguminosa forrageiras**. 1986. 107 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

BURIOL, G. A. et al. Modificação na temperatura mínima do ar por estufas de polietileno transparente de baixa densidade. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Santa Maria, v. 1, p. 43-49, 1993.

CALVACHE, A. M. et al. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso da água em uma cultura de feijão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, p. 1-15, 1997.

CAMARGO, M. S. et al. Soil reaction and absorption of silicon by rice. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, p. 176-180, 2007.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.) **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.147-196.

CARLESSO, R. **Influence of soil water deficits on maize growth and leaf area adjustments**. East Lansing: Michigan State University, 1993.

CARLQUIST, S. **Comparative wood anatomy**: systematic, ecological and evolutionary aspects of dicotyledons wood. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 427 p.

CARLQUIST, S. **Ecological strategies of xylem evolution**. Berkeley: University of California, 1988. 259 p.

CASTRO, E. M. et al. Aspectos anatômicos e fisiológicos de plantas de guaco submetidas a diferentes fotoperíodos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, p. 846-850, 2005.

CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal**: estrutura e função dos órgãos vegetativos. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.

CERMAK, J.; KUCERA, J.; PENKA, M. Improvement of a method of sap flow determination in fully-grown trees based on heat balance with direct electrical heating of xylem. **Biologic Plantarum**, Prague, v. 18, p. 99-105, 1976.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 30, p. 239-599, 2003.

CHEN, C.; KAO, C. H. Osmotic estress and water estress have opposite effects on putrescine and proline production in excised rice leaves. **Plant Growth Regulation**: an international journal on natural and synthetic regulators, Dordrecht, v. 13, p.197-202, 1993.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. de. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso da água. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.

COELHO, A. M.; FRANCA, G. E. Seja doutor do seu milho: nutrição e adubação. **Arquivo do Agrônomo**, Piracicaba, n. 2, p. 1-9, 1995.

COHEN, S. et al. The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a shamouti orange hedgerow orchard. Part II. Photosynthesis, transpiration, and the effect of row shape and direction. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 40, p. 145-162, 1981.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira**: grãos, décimo levantamento. Brasília, 2012.

CONSULTATIVE GROUP INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH. **Challenge program on water and food**: background papers to full proposal. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 2002.

COSTA, R. R.; MORAES, J. C. Interação silícioimidacloprid no comportamento biológico e alimentar de *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae) em plantas de trigo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 455-460, 2009.

CRAFTS-BRANDNER, S. J.; PONELEIT, C. G. Selection for seed growth characteristics: effect on leaf senescence in maize. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 127-131, 1992.

CRUZ, J. C. et al. **Manejo da cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

CUARTERO, J.; MUÑOZ, R. F. Tomato and salinity. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 78, n. 1/4, p. 83-125, 1999.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Efeito da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 85-97.

DANTAS, A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon on agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 424 p.

DEREN, C. Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 149-158.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.

DIDONET, A. D. et al. Efeito da radiação solar e temperatura na definição do número de grãos em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 933-938, 2002.

DURÃES, F. O. M. et al. Phenotyping maize for drought response in Brazilian tropical lands: Approaches to breeding programs and genomics studies. p. 7-9 In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED APPROACHES TO SUSTAIN AND IMPROVE PLANT PRODUCTION UNDER DROUGHT STRESS, 2., 2004, Rome. **Annals ...** Rome: Interdrought-II Committee; University of Rome, 2004.

EDWARDS, W. R. N.; WARWICK, N. W. M. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman- Monteith equation. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 27, p. 537-543, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1999. 412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

_____. **Cultivo do milho**. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/index.php/cpafrr/artigos>>. Acesso em: 18 fev. 2013.

_____. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Brasília: Embrapa Milho e Sorgo, 1993. 204 p.

ENDRES, L. et al. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 11-16, 2010.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. Rio de Janeiro: LTC, 1975. 314 p.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 1-15.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings National of Academy Science**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: E. Blusher, 2000.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. In: _____. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. cap. 1, p. 21-53.

_____. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária. 2004. 360 p.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 186 p.

FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FENG, M. J. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004.

FERREIRA, D. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, V. M. **Aspectos de crescimento, nutrição e relações hídricas em dois genótipos de milho (Zea mays L.) em função da disponibilidade de água no solo**. 1997. 357 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 18 ago. 2007.

FORNASIERI FILHO, D. **A cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 273 p.

FOY, C. D. et al. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 29, p. 511-566, 1978.

FREITAS, L. B. de et al. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 58, n. 2, 2011.

FREITAS, L. B. et al. Efeito da adubação foliar com silício na cultura do milho. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 17., 2008, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: FERTBIO, 2008. Disponível em: <<http://www.fertbio2008.com.br>>. Acesso em: 25 nov. 2010.

FURLANI, P.; GALLO, J. R. Determinação de silício em material vegetal, pelo método colorimétrico do "azul-de-molibdênio". **Bragantia**, Campinas, v. 37, n. 1, p. 5-11, 1978.

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

GHANNOUM, O. C4 photosynthesis and water stress. **Annals of Botany**, London, v. 103, p. 635-644, 2009.

GHANNOUM, O. et al. Nonstomatal limitations are responsible for drought-induced photosynthetic inhibition in four C₄ grasses. **New Phytologist**, Cambridge, v. 159, p. 599-608, 2003.

GOMES FILHO, R. R.; TAHIN, J. F. Respostas fisiológicas de cultivares de caupi (*Vigna unguiculata*) eretos e decumbentes a diferentes níveis de irrigação. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 10, p. 56-60, 2002.

GOMIDE, R. L. Automação de sistemas de irrigação em fruticultura irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 16., 2000, Fortaleza. **Palestra...** Fortaleza, 2000. p. 156-181.

GOMIDE, R. L.; JORDAN, K. A.; SLACK, D. C. A transient heat probe sensor for measuring transpiration in woody plant stems. In: WORKSHOP ON REAL TIME SENSING AND CONTROL OF AUTOMATED IRRIGATION

SYSTEMS, 16., 1992, Budapest. **Proceedings...** Budapest: ICID, 1992. p. 51-58.

GONG, H. et al. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, Limerick, v. 169, p. 313-321, 2005.

GUERRA, A. F. Manejo da irrigação sob condições de cerrado visando o potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 7, p. 1111-1118, 1994.

GUNES, A. et al. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, ingrowth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communication Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, p. 1885-1903, 2008.

GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 127-157, 1999.

GRISI, F. A. et al. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café 'Catuaí' e 'Siriema' submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1730-1736, 2008.

HALE, M. G.; ORCUTT, D. M. **The physiology of plants under stress**. New York: J. Wiley, 1987. 206 p.

HASEGAWA, P. et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 51, n. 1, p. 463-499, 2000.

HATTERSLEY, P.W. C₄ photosynthetic pathway variation in grasses (Poaceae): its significance for arid and semi-arid lands. In: CHAPMANN, C. P. (Ed.). **Desertified grasslands: their biology and management**. London: Academic, 1992. p. 181-212.

HATTERSLEY, P. W. Characterization of C₄ type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll:bundles sheath area ratios. **Annual of Botany**, London, v. 53, p. 163-179, 1992.

HATTORI, T. et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. **Plant Physiology**, Washington, v. 123, p. 459-466, 2005.

HODSON, M. J. et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**, London, v. 96, n. 1, p. 1027-1046, 2005.

HSIAO, T. C. Plant response to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

JONES, H. G. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal Experimental of Botany**, Oxford, v. 49, p. 387-398, 1988.

JORDAN, W. R. Whole plant response to water deficits: An overview. In TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: ASA; CSSA; SSA, 1983. p. 289-317.

KAUFMANN, M. R. Water deficits and reproductive growth. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic, 1972. 120 p.

KHASAWNEH, F.E. Solution ion activity on plant growth. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, n. 3, p. 426-436, 1971.

KLAR, A. E.; PORTO, C. A. L. Efeitos do déficit hídrico em parâmetros fisiológicos de folhas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.). **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu, v. 3, n. 3, p. 151-163, 1998.

KORNDÖRFER, G. H. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 39 p. (Boletim Técnico, 02).

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 101-106, 1999.

KORNER, C. H.; SCHEEL, J. A.; BAUER, H. Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. **Photosynthetica**, Prague, v. 13, p. 45-82, 1979.

KOZLOWSKI, T. T. Plant responses to flooding of soil. **BioScience**, Washington, v. 34, p. 162-167, 1984.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plant and soils**. New York: Academic, 1995.

KRAMER, P. J. Fifty years of progress in water relations research. **Plant Physiology**, Washington, v. 54, p. 463-471, 1974.

KRAUS, J. E.; ARDUIM, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Seropédica: Edur, 1997. 221 p.

KRIEG, D. R. Stress tolerance mechanisms in above ground organs. In: WORKSHOP ON ORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESS, 1993, Nebraska. **Proceedings...** Nebraska: Intsormil, 1993. p. 65-79.

LACERDA, C. F. **Crescimento e acúmulo de solutos orgânicos e inorgânicos em dois genótipos de sorgo forrageiros submetidos a estresse salino**. 2000. 163 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

LAETSCH, W. M. The C₄ syndrome: a structural analysis. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 25, p. 27-52, 1974.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2000. 531 p.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 102, p. 15-27, 2004.

LO GULLO, M. A. Relations between vulnerability to xylem embolism and xylem conduit dimensions in young trees of *Quercus cerris*. **Plant, Cell and Environment**, Malden, v. 18, p. 661-669, 1995.

LUTTS, S.; BOUHARMONT, J.; KINET, J. M. Physiological characterizations of salt-resistant rice (*Oryza sativa* L.) somaclone. **Australian Journal Botany**, Melbourne, v. 47, n. 6, p. 835-849, 1999.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. (Ed.). **Silicon in agriculture**. New York: Elsevier Science, 2001. cap. 5, p. 17-39.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002. 503 p.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 11, p. 342-397, 2006.

MAGALHÃES, A. C. N. Fotossíntese, particionamento de assimilados e crescimento de plantas sob condições de estresse: com destaque para o milho. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRESSE AMBIENTAL, 1., 1992, Belo Horizonte. **Resumos...** Sete Lagoas: EMBRAPA/CNPMS; México: CIMMYTIUNDP, 1995. p. 195-22.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Ecofisiologia**. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br>>. Acesso em: 25 jul. 2008.

MAGALHÃES, P. C. et al. **Caracterização de plantas de milho sob estresse hídrico**. Sete Lagoas: MAPA/Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 6 p. (Circular Técnica, 16).

MAGALHÃES, P. C. et al. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: MAPA/Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 23 p. (Circular Técnica, 22).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic, 1995. 889 p.

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. 1994. 172 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. The adsorption of monosilic acid by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, p. 83-95, 1963.

MELCHER, P. J. et al. Comparative measurements of xylem pressure in transpiring and non-transpiring leaves by means of the pressure chamber and the xylem pressure probe. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, n. 327, p. 1757-1760, Oct. 1998.

MELO, H. C. et al. Influência da aplicação de cálcio e alagamento do solo sobre características anatômicas das folhas de milho (*Zea mays* L.) "Saracura" BRS-4154. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 3, p. 333-342, 2004.

MENDES, R. M. S. et al. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 38, p. 95-103, 2007.

MERVA, G. E. **Physical principles of the plant biosystem**. Saint Joseh: ASAE, 1996. 272 p.

MEYER, B. et al. **Introdução à fisiologia vegetal**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1973. 710 p.

MEYER, W. S.; GREEN, G. C. Water use by wheat and plant indicator of available soil water. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 253-257, 1980.

MOHR, H.; SCHOPFER, P. **Plant physiology**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 629 p.

MORGAN, K. T.; PARSONS, L. R.; WHEATON, T. A. Comparison of laboratory and field, derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric resistance and capacitance methods. **Plant and Soil**, The Hague, v. 234, p. 153-157, 2001.

MOTA, F.S. **Meteorologia agrícola**. 7. ed. São Paulo: Nobel, 1983.

NEPOMUCENO, A. L. et al. Tolerância à seca em plantas: mecanismos fisiológicos e moleculares. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, Brasília, n. 23, p. 12-18, 2001.

NERI, D. K. P. et al. A interação silício com inseticida regulador de crescimento no manejo da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 6, p. 1167-1174, 2005.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. New York: Academic, 1999.

NOCTOR, G. Drought and oxidative load in the leaves of C₃ plants: a predominant role for photorespiration. **Annals of Botany**, London, v. 89, p. 841-850, 2002.

NOCTOR, G.; FOYER, C. H. Redox homeostasis and antioxidante signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **Plant Cell**, Dordrecht, n. 17, p. 1866-1875, 2005.

NOVAIS, R. F. et al. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo: ensaio em ambiente controlado**. Brasília: EMBRAPA-SEA, 1991. 392 p.

OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em Feijão. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v. 25, p. 86-95, 2005.

OLIVEIRA, L. A. **Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PARENTONI, S. N. Inheritance and breeding strategies for phosphorus efficiency in tropical maize (*Zea mays* L.). **Maydica**, Bergamo, v. 55, p. 1-15, 2010.

PATAKAS, A. et al. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. **Plant Science**, Limerick, v. 163, p. 361-367, 2002.

PEREIRA, F. J. et al. Evolução da anatomia radicular do milho 'Saracura' em ciclos de seleção sucessivos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1649-1656, 2008.

PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C.; KORNDORFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n.1, p. 101-108, 2003.

PEZZOPANE, J. E. M. et al. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Santa Maria, v. 3, p. 1-4, 1995.

PICKARD, W. F. A heat pulse method of measuring water flux in woody plant stems. **Mathematical Biosciences**, New York, v. 16, p. 247-262, 1973.

PITMAN, W. D. et al. Histological differences in moisture-stressed and nonstressed kleingrass forage. **Crop Science**, Madison, v. 23, p. 793-795, 1983.

POZZA, A. A. A. et al. Efeito do silício no controle de cercosporiose em três variedades de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 29, p. 185-188, 2004.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-deaçúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 1199-1204, 2001.

PULZ, A. L. et al. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1651-1659, 2008.

PUPPALA, N. et al. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. **Industrial Crops and Products**, North Dakota, v. 21, p. 33-47, 2005.

QIU, G.Y. et al. Detection of crop transpiration and water stress by temperature-related approach under field and greenhouse conditions. **Japan Agricultural Research Quarterly**, Ohwashi, v. 34, n. 1, p. 29-37, 2000.

RAIJ, B. VAN et al. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG v. 22, p. 101-108, 1998.

RAMOS, L. A. et al. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG v. 30, p. 849-857, 2006.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Review**, New York, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

RENGEL, Z. Role of calcium in salt toxicity. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 15, n. 6, p. 625-632, 1992.

RESENDE, M. et al. **A cultura do milho**: viabilidade e manejo da irrigação. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2008. 449 p.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

SACHS, T.; NOVOPLANSKY, N.; KAGAN, M. L. Variable development and cellular patterning in the epidermis of *Rucus hypoglossum*. **Annals of Botany**, London, v. 71, p. 237-243, 1993.

SAKURATANI, T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. **Journal Agricultural Meteorology**, Tokyo, v. 40, n. 3, p. 273-277, 1984.

SALAH, H. B. H.; TARDIEU, F. Control of leaf expansion rate of droughted maize plants under fluctuating evaporative demand. **Plant physiology**, Rockville, v. 114, p. 893-900, 1997.

SANTIAGO, E. J. A. et al. Aspectos da anatomia foliar da pimenta-longa (*Piper hispidinervium* C. DC.) sob diferentes condições de luminosidade. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 5, p. 1035-1042, 2001.

SARMIENTO, J. L.; WOFSEY, S.C. A US Carbon Cycle Science Plan. **A Report of the Carbon and Climate Working Group**. Prepared at the request of agencies of the US Global Change Research Program. Washington, 1999. 69 p.

SCHOLANDER, P. F. et al. Hydrostatic pressure and osmotic potential of leaves in mangroves and some other plants. **Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia**, Philadelphia, v. 52, p. 119-125, 1964.

SCHOLANDER, P. F. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy Science**, Philadelphia, v. 51, p. 119- 125, 1965.

SILVA, A. A. et al. **Controle de plantas daninhas**. Brasília: ABEAS, 2000. 260 p.

SILVA, J. B. C.; NOVAIS, R. F.; SEDIYAMA, C. S. Identificação de genótipos de sorgo tolerantes à toxicidade de alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 7, n. 1, p. 77-83, 1984.

SILVA, S. C. **Relação entre o tamanho das sementes de milho (*Zea Mays* L.) com a germinação, o vigor e os componentes da produção de grãos**. 2000. 69 f. Dissertação (Mestrado em Produção e Tecnologia de Sementes) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.

SILVEIRA J. A. G. et al. N-compound accumulation and carbohydrate shortage on N₂ fixation in drought-stressed and rewatered cowpea plants. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 1, p. 65-75, 2003.

SOUZA, G. S. et al. Estrutura foliar e de cloroplastídeos em *Mikania laevigata* Shultz Bip. ex Baker em diferentes condições de qualidade de luz. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, p. 78-80, 2007.

SOUZA, L. S. B. de et al. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.715-721, 2011.

SOUZA, T. C. et al. Leaf plasticity in successive selection cycles of 'Saracura' maize in response to soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 1, p. 16-24, 2010.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKEY, D. A. **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach**. 3rd ed. Moorpark: Academic Internet Publishers, 2006. 666 p.

SURIYAN, CHA-UM.; NHUNG, N. T. H.; KIRDMANEE, C. Effect of manitol and salt induced iso-osmotic stress on proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of rice cultivars (*Oryza sativa* L ssp. Indica). **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, n. 9, p. 233-251, 2010.

TAKAHASHI, E.; MA, J. F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, Bad Feilnbach, n. 2, p. 99-122, 1990.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers**. New York: Mcmillan, 1985. 754 p.

TURNER, N. C. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. **Irrigation Science**, New York, v. 9, p. 289-308, 1988.

UNIVERSITY OF TEXAS HEALTH SCIENCE CENTER. **UTHSCSA ImageTool**. Version 3.0. 2002. Disponível em: <<http://www.etaj.com.br/~berte/imagenst/ImageTool/Home/download.htm>>. Acesso em: 17 jun. 2010.

VASELLATI, V. et al. Effects of flooding and drought on the anatomy of *Paspalum dilatatum*. **Annals of Botany**, London, v. 88, p. 355-360, 2001.

VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B. Comportamento de herbicidas na planta. Épocas de aplicação de herbicidas. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE MANEJO INTEGRADO DE PLANTAS DANINHAS EM HORTALIÇAS, 1992, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 1992. p. 65-86.

VERSLUES, P. E. et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, Blackwell, v. 45, p. 523-539, 2006.

WENSUO, J. et al. Metabolism of xylem-delivered ABA in relation to ABA flux and concentration in leaves of maize and *Commelia communis*. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 47, n. 301, p. 1085-1091, 1996.

WINKEL, T.; PAYNE, W.; RENNO, J. F. Ontogeny modifies the effect of water stress on stomatal control, leaf area duration and biomass partitioning of *Pennisetum glaucum*. **New Phytologist**, Cambridge, n. 149, p. 71-82, 2001.

WULLSCHLEGER, S. D.; OOSTERHUIS, D. M. Photosynthetic carbon production and use by developing cotton leaves and boll. **Crop Science**, Madison, v. 30, p. 1259-1264, 1990.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant response to drought, acclimation, and stress tolerance. **Photosynthetica**, Prague, v. 38, p. 171- 186, 2000.

ZHAO, J. et al. Difference in response to drought stress among Tibet wild barley genotypes. **Euphytica**, Wageningen, n. 172, p. 221-227, 2010.

ZHU, Z. et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, Limerick, v. 167, p. 527-533, 2004.

ZUCCARINI, P. Effect of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 52, n. 1, p. 157-160, 2008.