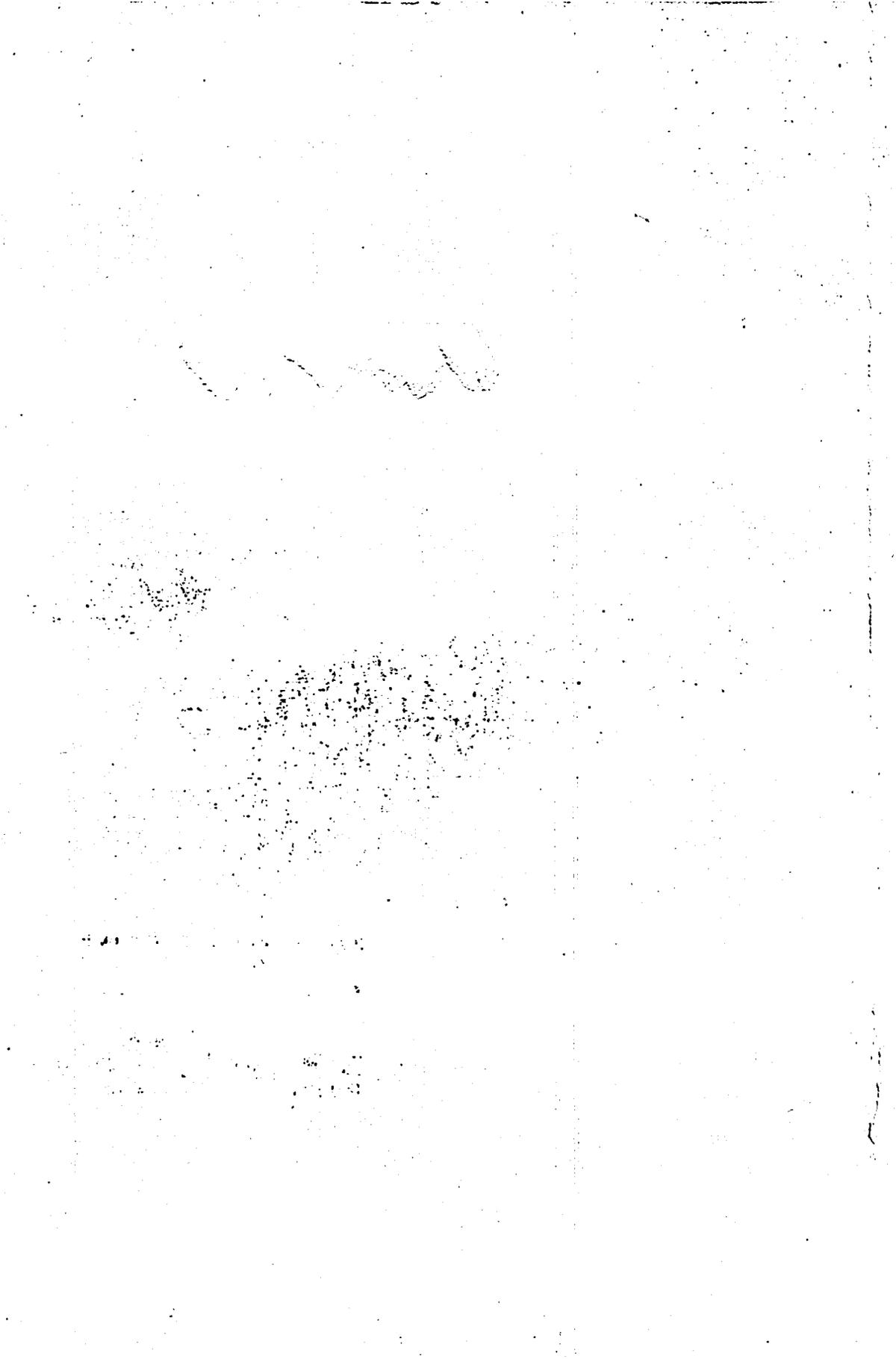


**AVALIAÇÃO DE SISTEMA ALTERNATIVO
DE AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO NA
CULTURA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*
L.)**

TADEU MIRANDA DE QUEIROZ

2004



57389
MEMO-49045

TADEU MIRANDA DE QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA ALTERNATIVO DE
AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO
FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração em Irrigação e Drenagem, para
obtenção do título de "Mestre".

[REDACTED]

Orientador

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

[REDACTED]

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

4.8.3 Número de grãos por vagem	86
4.8.4 Rendimento de grãos	87
4.8.5 Peso médio de 100 grãos.....	90
4.9 Eficiência	91
4.9.1 Eficiência de aplicação de água (EA)	92
4.9.2 Eficiência de uso da água (EU)	95
4.10 Comparação de custos	97
5 CONCLUSÕES.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO A	109
ANEXO B	113

TADEU MIRANDA DE QUEIROZ

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA ALTERNATIVO DE
AUTOMAÇÃO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DO
FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em Segunda-feira, 9 de Fevereiro de 2004.

Dr. Messias José Bastos de Andrade

UFLA

Dr. Luis Artur Alvarenga Vilela

UFLA



Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

Pela luz, sempre presente durante esta caminhada;

Ao meu irmão Fabrício

Pelos bons exemplos de coragem e persistência.

OFEREÇO

Aos meus pais, Fernando e Maria Amélia;

Aos meus irmãos, Daniel, Elizabeth & Bethânia, João e Osmir.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos dons da vida, da sabedoria e do entendimento;

Aos meus pais, que abdicaram da minha presença de filho, permitindo a busca incansável do conhecimento científico;

Aos meus irmãos, que mesmo distantes souberam transmitir confiança e carinho.

À minha namorada, Yanê B. G. Gruber, pelo incentivo, compreensão, carinho e amizade.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização deste curso.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo;

Ao professor orientador, Dr. Jacinto de Assunção Carvalho, pelo apoio, confiança e dedicação e pelo conhecimento compartilhado ao longo da vida acadêmica;

Aos educadores desta instituição pelo conhecimento transmitido e pela paciência;

Ao professor Dr. Giovanni F. Rabelo pelos conhecimentos e experiência transmitidos, sobre instrumentação e automação;

Ao professor Dr. Messias J. B. Andrade pela preciosa orientação no cultivo do feijoeiro;

À professora Janice Guedes pela brilhante participação na recomendação das adubações;

Ao Professor Dr. Luiz A. Vilela pelas dicas, pelo apoio e pelas parecerias em projetos de automação;

À Pesquisadora Fátima C. Rezende pela amizade e valiosa ajuda na correção deste trabalho;

Ao professor, amigo e ex-tutor do Grupo PET, Dr. Antônio Marciano da Silva, que ofereceu não somente asas, mas também espaço para voar;

À amiga Taciana Villela pela atenciosa ajuda no tratamento estatístico dos dados;

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica pela grande ajuda, cooperação e amizade;

Ao meu grande amigo 'Dr. Resende' (Kelte) pelos sete anos de convivência harmoniosa;

Às amigas Mell (Zélia Ferreira) e Dani* (Danicla Torres), pelos bons momentos compartilhados;

Aos companheiros de república Hudson Carvalho, Márcio Koets e Tiago;

Aos amigos do 'Brejão', Cezar, Natalino, Túlio e Zilton, pela amizade e colaboração;

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Tadcu Miranda de Queiroz, filho de Fernando Borges de Queiroz e Maria Amélia Miranda de Queiroz, nasceu em 15 de fevereiro de 1976, em Patos de Minas, estado de Minas Gerais. Concluiu o curso Técnico em Agropecuária pela Escola Estadual Agrotécnica Afonso Queiroz (Escola Agrícola de Patos de Minas) em 1995. Trabalhou como técnico agrícola até fevereiro de 1997. Gradou-se Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Lavras em abril de 2002, ano em que ingressou no Mestrado de Engenharia Agrícola/Área de Irrigação e Drenagem na mesma universidade, concluindo-o em fevereiro de 2004.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 A cultura do feijoeiro.....	3
2.2 Manejo da irrigação.....	5
2.3 Tensiometria.....	6
2.3.1 Limites de tensão recomendados.....	8
2.3.2 Limitações de utilização do tensiômetro.....	9
2.3.3 Número de tensiômetros e local de instalação.....	10
2.4 Capacidade de campo (Cc)	11
2.5 Automação e instrumentação	12
2.6 Controladores automáticos de irrigação.....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Localização e época do experimento.....	16
3.2 Delineamento experimental	16
3.3 Tratamentos utilizados.....	17
3.4 Construção e adaptação dos tensiômetros.....	17
3.4.1 Tampa	18
3.4.2 Tensiômetro de mercúrio	19
3.4.3 Vacuômetro de Bourdon	21
3.5 Calibração do vacuômetro de Bourdon.....	24
3.6 Instalação dos tensiômetros.....	25
3.7 Controlador de irrigação	25
3.7.1 Funcionamento do circuito.....	27

3.8 Solo utilizado no experimento.....	28
3.8.1 Análises físicas.....	28
3.8.2 Análise química.....	32
3.9 Instalação do experimento.....	32
3.9.1 Preparo dos vasos.....	32
3.9.2 Sistema de irrigação.....	33
3.9.3 “Layout”.....	35
3.9.4 Semeadura e manejo inicial.....	36
3.10 Manejo da irrigação.....	36
3.10.1 Irrigação no manejo convencional.....	37
3.10.2 Irrigação automatizada.....	38
3.11 Custo.....	39
3.11.1 Tensiômetro com vacuômetro de mercúrio.....	39
3.11.2 Tensiômetro com vacuômetro de Bourdon.....	40
3.11.3 Tensiômetro convencional (tensímetro).....	40
3.11.4 Controlador.....	40
3.11.5 Fonte regulada.....	41
3.11.6 Circuito de potência.....	41
3.12 Manutenção do sistema de manejo.....	41
3.13 Cultivar de feijoeiro utilizada.....	42
3.14 Semeadura e práticas culturais.....	43
3.14.1 Tutoramento.....	43
3.14.2 Calagem e adubação.....	44
3.14.3 Controle fitossanitário.....	46
3.15 Avaliações.....	47
3.15.1 Tensiômetros.....	47
3.15.2 Controlador.....	48
3.15.3 Volume de água aplicado.....	48

3.15.4	Número de acionamentos ou irrigações	48
3.15.5	Crescimento.....	48
3.15.6	Número de vagens por planta	49
3.15.7	Número de grãos por planta	50
3.15.8	Número de grãos por vagem	50
3.15.9	Peso médio de 100 grãos.....	50
3.15.10	Rendimento de grãos.....	51
3.15.11	Eficiência de aplicação de água	51
3.15.12	Eficiência de uso da água	51
3.16	Análises estatísticas	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Caracterização das condições internas da estufa	53
4.2	Funcionamento dos tensiômetros	55
4.2.1	Tampa alternativa	55
4.2.2	Tensiômetros de vacuômetro de mercúrio	55
4.2.3	Tensiômetros de vacuômetro de Bourdon.....	56
4.2.4	Tensímetro	57
4.3	Funcionamento do controlador.....	58
4.4	Número de irrigações e turno de rega	59
4.5	Volume de água aplicado por irrigação	62
4.6	Volume de água aplicado por vaso.....	67
4.7	Crescimento do feijoeiro.....	70
4.7.1	Matéria seca da parte aérea	70
4.7.2	Altura da haste principal	72
4.7.3	Diâmetro do caule.....	77
4.8	Características agronômicas do feijoeiro	80
4.8.1	Número de vagens por planta	81
4.8.2	Número de grãos por planta	84

4.8.3 Número de grãos por vagem	86
4.8.4 Rendimento de grãos	87
4.8.5 Peso médio de 100 grãos.....	90
4.9 Eficiência	91
4.9.1 Eficiência de aplicação de água (EA)	92
4.9.2 Eficiência de uso da água (EU)	95
4.10 Comparação de custos	97
5 CONCLUSÕES.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO A	109
ANEXO B	113

RESUMO

QUEIROZ, Tadeu Miranda de. **Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**, 2004. 120 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, LAVRAS, MG.*

O presente trabalho teve como objetivo avaliar um sistema alternativo de controle da irrigação na cultura do feijoeiro. Utilizou-se um modelo de controlador alternativo ligado a tensiômetros adaptados como sensores de umidade. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 3x4, sendo três métodos de manejo da irrigação e quatro tensões de água no solo. Os métodos foram: manejo manual (Ts), manejo automático utilizando tensiômetros de vacuômetro de mercúrio (Hg) e manejo automático com tensiômetros de vacuômetro de Bourdon (Vc). As tensões matriciais utilizadas foram: 15; 30; 45 e 60 kPa. Foram cultivadas, em ambiente protegido, três plantas de feijão em cada vaso de 13 dm³. No manejo manual a tensão matricial foi determinada através de um tensiômetro digital portátil. Foram utilizados três tensiômetros em cada tratamento e a tensão de referência para irrigação foi tomada como a média das três leituras. No manejo automático (Hg e Vc) o momento da irrigação foi definido pelo controlador que acionou o sistema sempre que pelo menos dois dos três tensiômetros, indicaram a tensão equivalente ao tratamento. Avaliou-se o funcionamento do controlador, a eficiência dos tensiômetros, o volume de água aplicado, a altura das plantas, o diâmetro do caule e a matéria seca da parte aérea, o número de vagens por planta, o número de grãos por planta, o número de grãos por vagem, a produtividade, o peso de 100 grãos, a eficiência de aplicação e a eficiência de uso da água. Verificou-se que o controlador e os tensiômetros de mercúrio não apresentaram problemas, enquanto os tensiômetros de vacuômetro de Bourdon não funcionaram satisfatoriamente. O manejo manual dificultou a determinação da tensão limite para irrigação, no entanto não houve diferença entre os métodos de manejo para o volume aplicado e o rendimento de grãos. De maneira geral, as tensões não afetaram o desenvolvimento das plantas.

* Comitê Orientador: Dr. Jacinto de Assunção Carvalho – DEG/UFLA (Orientador), Dr. Messias José Bastos de Andrade – DAG/UFLA, Dr. Giovanni Francisco Rabelo – DEG/UFLA.

ABSTRACT

QUEIROZ, Tadeu Miranda de. **Evaluating the alternative automation system in beans crops (*Phaseolus vulgaris*) irrigation.** 2004. 120 p. Dissertation (Master in Irrigation and Drainage) - Federal University of Lavras, Lavras, MG*

This work was carried out with the objective of evaluating an alternative system to control the beans crops irrigation system. A digital controller linked to tensiometers adapted to be moisture sensors was used. A randomized block design with a factorial 3x4 arrangement (three irrigation dealing methods and four soil water tensions) was used. The methods were as follows: manual handling (Ts), automatic system using Hg vacuometers tensiometers (Hg), and Bourdon vacuometers tensiometers (Vc). The matrcial tensions used were as follows: 15, 30, 45, and 60 kPa. Three beans plants were cultivated in three 13dm vases. The matrcial tension for the manual handling was determined by using a portable digital tensimeter. Three tensimeers were used in each treatment. The reference tension for irrigation was taken as a means for the three readings. When automatic dealing was used (Hg and Vc) the irrigation time was established by the controller which turned on the system every time that at least two out of the three tensiometers showed a tension equivalent to the treatment. The controller's working, the tensionmeters effectiveness , the volume of water applied, the plants height, the stem diameter and the dry matter of the aereal part, the number of beans per plant, the number of grains per plant, the number of grains per green bean, yield, the weight of 100 grains, both application and water use effectiveness were determined. Neither the controller nor the tensionmeters showed any problems whereas the Bourdon vacuometer tensionmeters did not work appropriately. The manual handling made it difficult to determine the tension limit for irrigation. However no difference was found between the handling methods for the applied volume and the grains yield. In a general the tensions did not seem to affect the plants growth.

* Guidance Committee: Dr. Jacinto de Assunção Carvalho - DEG/UFLA (Major Professor), Dr. Messias José Bastos de Andrade - DAG/UFLA, Dr. Giovanni Francisco Rabelo - DEG/UFLA.

1 INTRODUÇÃO

O campo da eletrônica sofreu, nas últimas décadas do século XX, extraordinárias modificações. A válvula, que de algum modo teve influência em todos os aspectos da civilização humana, foi quase totalmente substituída pelo transistor. Circuitos integrados foram implementados em micro ships, o computador foi inventado, melhorado, miniaturizado e popularizado. O “futurismo” atingiu o seu auge com a famosa Guerra Fria e as tecnologias desenvolvidas invadiram violentamente nossas vidas.

Sistemas automáticos são desenvolvidos a todo instante para as mais variadas aplicações. A agricultura, que avançou muito no final do último século, não é diferente e vem experimentando esse “futurismo” com muita intensidade. O Brasil, a exemplo dos países ditos desenvolvidos, vem se fartando desta fabulosa evolução.

A engenharia agrícola tem desempenhado brilhantemente o seu papel. A irrigação hoje já conta com sistemas que “faltam falar”, ou melhor, até falam e é cada vez mais crescente o número de agricultores que investem em sistemas automáticos nas suas unidades produtivas. No entanto, a tecnologia disponível no momento, introduzida por empresas multinacionais, atende muito bem aos grandes e médios investidores, deixando de lado os pequenos agricultores que, na sua grande maioria, no Brasil, encontram-se descapitalizados.

No mercado brasileiro existem vários modelos de controladores de irrigação, os quais fazem a aplicação de água com base em aplicativos computacionais, não considerando as condições intrínsecas ao sistema água-solo-planta-atmosfera. Além de não realizarem o manejo da maneira mais adequada, muitos destes controladores são importados, seu custo é dolarizado e, geralmente, muito alto.

No manejo da irrigação uma pergunta difícil de se responder é “quando irrigar?”. Esta é uma pergunta importante e a que menos se responde na prática. A definição do “quando?” é tarefa árdua, visto que o sistema água-solo-planta-atmosfera é extremamente complexo. O solo, reservatório natural de água, é um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso) e infinitamente heterogêneo. Quantificar a proporção líquida (basicamente composta de água) é condição fundamental para a tomada de decisão.

Atualmente muitos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de mostrar que existem soluções simples e baratas para automação de sistemas de irrigação. Sensores têm sido adaptados para dar suporte aos controladores alternativos desenvolvidos e novos produtos estão sendo criados.

Considerando a necessidade atual de desenvolver trabalhos com automação alternativa de baixo custo, buscou-se: a) avaliar um controlador de irrigação alternativo; b) avaliar tensiômetros adaptados para funcionarem com sensores de umidade do solo; c) estudar três métodos de manejo da irrigação e seu efeito na cultura do feijoeiro em diferentes tensões dentro do limite recomendado para o bom funcionamento do tensiômetro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do feijoeiro

O feijoeiro é considerado uma das culturas mais importantes do Brasil, pois é o alimento básico para a população (Guerra, 1981), sendo cultivado principalmente por pequenos produtores, em todas as unidades da Federação, e tendo sua produção destinada basicamente ao mercado interno (Machado, 1988). Mesmo havendo grandes unidades produtivas ainda se verifica, em muitos casos, o cultivo do feijoeiro com baixos níveis de tecnologia, conferindo-lhe o caráter de subsistência (Areas et al., 2003).

A cultura do feijoeiro é explorada basicamente em três safras durante o ano agrícola: “das águas”, “da seca” ou “safrinha” e “de inverno” (Nagoaka et al., 2001). A produção brasileira é mais concentrada na safra “das águas”, com participação de 39,08% do total, seguida pela “da seca”, com 38,59%, e pela “do inverno”, com 22,33% da produção (Agrianual, 2003).

A produtividade da cultura é função de diversos fatores, destacando-se as inter-relações entre solo-água-planta-atmosfera e manejo da irrigação visando a máxima produção e a boa qualidade do produto. No entanto, poucos agricultores têm empregado esta técnica como prática normal e recomendada (Macedo Junior, 1993).

Em relação às características climáticas, o feijoeiro é considerado sensível tanto às baixas quanto às altas temperaturas (Andrade, 1998; Dickson & Petzoldt, 1987). A temperatura média ótima durante o ciclo cultural do feijoeiro deve ser de 18 a 24 °C, sendo 21 °C a ideal (Scully & Waines, 1987; Doorenbos, 1994). A ocorrência de temperaturas acima ou abaixo da faixa ótima, dependendo da frequência e da duração, pode ocasionar sérios prejuízos ao

estabelecimento, crescimento e desenvolvimento da cultura, resultando em baixos rendimentos de grãos (Andrade, 1998; Dickson & Petzoldt, 1987). As baixas temperaturas também podem contribuir para o prolongamento do ciclo, especialmente devido à demora na emergência (Von Pinho, 1990; Nunes, 1997).

O feijoeiro é considerado sensível tanto ao déficit quanto ao excesso de água no solo (Valadão & Klar, 1996), principalmente nas fases de florescimento e de desenvolvimento das vagens (Rezende et al., 2002). Reis et al. (2002) destacam a alta susceptibilidade da cultura do feijoeiro durante toda a fase reprodutiva.

O correto manejo da irrigação é um dos aspectos mais importantes para se obterem altas produtividade no cultivo do feijoeiro, evitando o desperdício de água ao longo do ciclo vegetativo das plantas (Chieppe Jr. et al., 2003), minimizando o custo de energia, aumentando a eficiência dos adubos, diminuindo a incidência de doenças e melhorando ou mantendo as condições químicas e físicas do solo (Silveira & Stone, 2001).

Macedo Junior (1993), trabalhando com feijoeiro cultivado em vasos em casa de vegetação e submetido aos potenciais matriciais de -10; -100; -200; -500 e -1500 kPa, verificou menor produção de grãos para o tratamento -500 kPa, sendo que os demais não apresentaram diferenças entre si. Verificou-se a maior média do número de vagens por planta no tratamento -100 kPa. Para o número de grãos por vagem, não houve diferença estatística. Estes resultados não condizem com a literatura, mas o autor os justifica relatando as condições nas quais o experimento foi conduzido, caracterizando um período de dias nublados, com umidade relativa alta e baixas temperaturas, o que pode ter limitado a demanda evapotranspirométrica.

Em decorrência do alto investimento inicial do equipamento de irrigação, torna-se necessário que o cultivo do feijoeiro seja conduzido em alta

tecnologia para assegurar uma produtividade elevada, estável e garantida (Peloso, 1990).

Neste contexto, verifica-se a necessidade de suplementação hídrica através de irrigações, em função da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (Rubin et al., 2002).

2.2 Manejo da irrigação

Em algumas regiões do Brasil, os recursos hídricos são escassos, requerendo estudos criteriosos para a orientação com relação ao uso mais eficiente da água. A irrigação é uma alternativa tecnológica para contornar o problema hídrico, visando assegurar o aumento da produtividade tanto em quantidade como em qualidade dos produtos (Gomide, 2002; Ulloa, 1997).

A agricultura irrigada apresenta diversos benefícios que só podem ser alcançados em toda sua plenitude quando o sistema de irrigação for utilizado com critérios de manejo que resultem em aplicações de água no momento oportuno e nas quantidades compatíveis com as necessidades de consumo das culturas irrigadas (Silva et al., 2001; Faria & Costa, 1987).

Tanto o excesso quanto a falta de água são fatores que afetam, de maneira marcante o rendimento das lavouras irrigadas e, conseqüentemente, o retorno econômico desse sistema de produção (Saad & Libardi, 1994).

O manejo adequado da irrigação do feijoeiro tem o objetivo de maximizar a produtividade da cultura, minimizar o uso da água e custo de energia, aumentar a eficiência de adubos, diminuir a incidência de doenças e manter ou melhorar as condições químicas e físicas do solo, entre outros (Silvcira & Stone, 2001; Stanley & Maynard, 1990).

A metodologia para o manejo da irrigação, embora disponível, ainda não foi apresentada aos produtores de modo a facilitar a sua adoção, o que contribui para a ausência de manejo (Silveira & Stone, 2001).

Gondim et al. (1998) avaliaram economicamente o uso do tensiômetro, do tanque classe "A" (TCA) e da equação de Hargreaves no cálculo da lâmina de irrigação em feijão caupi para consumo de grãos verdes. Os autores verificaram que a utilização do tensiômetro permitiu uma economia de água de 28% e 23% em relação ao TCA e à equação de Hargreaves, respectivamente. A água representou 41,2% dos custos com o emprego do tensiômetro, 49,8% com o TCA e 49,4% com a equação de Hargreaves, apesar de não ter sido detectada diferença significativa (ao nível de 5% de probabilidade) nem entre as produtividades alcançadas nem entre as receitas líquidas obtidas.

Segundo Silveira & Stone (2001), o método de manejo baseado na tensiometria é simples e prático. Os autores recomendam a utilização de tensiômetro dotado de vacuômetro mecânico, que tem seu emprego mais difundido para o controle das irrigações no campo, em virtude de sua simplicidade e facilidade de operação, comparado com o tensiômetro de mercúrio. No entanto, o tensiômetro de mercúrio possui maior precisão nas leituras, sendo o mais utilizado em trabalhos de pesquisa, porém é de difícil manuseio (Azevedo & Silva, 1999, citados por Silveira & Stone, 2001).

Atualmente o tensiômetro digital de punção (tensímetro) tem sido muito empregado em razão da "diluição" do custo com o aumento do número de pontos de leitura, simplicidade de manuseio e precisão de leitura.

2.3 Tensiometria

A tensiometria, apesar de bastante difundida na área técnica, é pouco utilizada pelos irrigantes por vários motivos, dentre eles o custo.

Segundo Faria & Costa (1987), o tensiômetro vem sendo estudado desde a introdução do conceito de potencial matricial por Buckingham, em 1907, seguido pelo início do seu desenvolvimento por Gardner et al., em 1922 e por aperfeiçoamentos realizados por Richards, Heck e Rogers, no período de 1928 a 1935.

O tensiômetro com manômetro de mercúrio foi utilizado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) desde 1988 em experimentos de controle da irrigação por pivô central, nos Latossolos da região de Guaíra-SP, com excelentes resultados. Este fato tem dado a tal instrumento, de custo relativamente baixo, alta confiabilidade para utilização em tais tipos de solos (Saad & Libardi, 1992).

Saad & Libardi (1994) aferiram o controle da irrigação nas culturas de milho e tomate, cultivados em pivô central, utilizando tensiômetros de faixa. Os autores observaram que as irrigações não provocaram drenagem profunda, mostrando que o agricultor soube repor a água no momento e na quantidade certa e que o tensiômetro de faixas facilitou muito a tomada de decisão no início da rega.

O tensiômetro pode ser de fácil construção, utilização e instalação, podendo constituir ferramenta útil ao agricultor que deseja maximizar o uso da água, quando da irrigação em sua lavoura (Faria & Costa, 1987; Brasil et al., 2003). Além de apresentar grandes vantagens em relação a outros métodos, é um aparelho simples, barato, não requer calibração e fornece leituras instantâneas.

Dentre diferentes métodos de controle de irrigação, os tensiômetros de cápsula de porcelana porosa são os mais utilizados (Silva et al., 2003).

Brasil et al. (2003) avaliaram a precisão, exatidão e resolução de vacuômetros de Bourdon metálico da marca FAMABRÁS, modelo FL- 62/1 com escala de 0 a 100 kPa, e concluíram que os mesmos são instrumentos precisos, com alto grau de exatidão, e que possuem resolução equivalente ao

tensiômetro de Hg, principalmente no intervalo de medidas utilizadas para o manejo da irrigação, que é de 10 a 60 kPa.

Junqueira et al. (1998) avaliaram o desempenho de vacuômetros e cápsulas nacionais na construção de tensiômetros de baixo custo. Foram utilizados vacuômetros mecânicos fabricados pela empresa Salvi Casagrande e cápsulas porosas da Cerâmica Vera Cruz. Os autores concluíram que os vacuômetros apresentaram funcionamento adequado e as cápsulas, bom desempenho nos testes de borbulhamento e condutância hidráulica. Em relação ao custo, obtiveram economia de 60% em relação ao preço de mercado, sem considerar a mão-de-obra.

2.3.1 Limites de tensão recomendados

Tensão matricial de 0 kPa (zero) indica solo saturado e as plantas sofrem por falta de oxigênio. De 0 a -6 kPa o solo é muito úmido para a maioria das culturas. Tensões de -6 a -25 kPa correspondem à condição ideal de umidade e aeração do solo. Em tensões acima de -25 kPa pode ocorrer deficiência hídrica em plantas sensíveis, com sistema radicular superficial. A maioria das culturas com sistema radicular com profundidade de cerca de 0,50 m não sofre deficiência hídrica em leituras abaixo de -40 a -50 kPa. Plantas com sistema radicular mais profundo (cerca de 1 m) usualmente não apresentam decréscimo de produção abaixo de -70 kPa. Estes valores são considerados quando se coloca a cápsula cerâmica do aparelho no ponto médio da maior porção do sistema radicular da cultura (Faria & Costa, 1987).

Bernardo (1995) recomenda, para a faixa de trabalho do tensiômetro, valores de 0 a 75 kPa e cita que, para esta faixa, o tensiômetro cobre 70% da água disponível em solos arenosos e 40% em solos argilosos. Valores semelhantes para a faixa de trabalho são recomendados por Faria & Costa

(1987). Estes valores correspondem à faixa ótima para desenvolvimento da maioria das culturas, cobrindo de 25 a 75% da água disponível no solo, dependendo da sua textura e estrutura.

2.3.2 Limitações de utilização do tensiômetro

De acordo com trabalhos realizados com tensiômetros convencionais, grandes oscilações das leituras no aparelho ocorrem devido às flutuações de temperatura ao longo do dia, dificultando a determinação precisa do potencial de água no solo. A literatura reporta declínio gradual nas leituras em sistemas de tensiômetros/transdutor e tensiômetro de Bourbon com o aumento da temperatura (Araújo et al., 2003).

Hubbel & Sisson (1998) mostram que a determinação precisa do potencial de água no solo através do tensiômetro é afetada pelas flutuações de temperatura ao longo do dia e recomendam a utilização de um transdutor de temperatura para a correção instantânea do potencial medido quando forem utilizados métodos de medida eletrônica. A entrada de ar ou embolismo também tem limitado o uso dos tensiômetros a tensões entre 0 e 100 kPa (Calbo & Silva, 2003).

A tensiometria, apesar de bastante difundida na área técnica, é pouco utilizada pelos irrigantes por vários motivos, dentre eles o elevado custo de alguns modelos.

O instrumento padrão para medidas de potencial matricial de água no solo é o tensiômetro de mercúrio, porém, requer considerável manutenção em condições de campo e apresenta problemas relacionados à saúde e riscos de poluição ambiental (Brasil et al., 2003).

Além das limitações técnicas, devem-se considerar também as limitações econômicas. Atualmente, com a popularização da eletrônica, vários trabalhos

(Araújo et al., 2003; Hayashi et al., 1997; Nyhan & Drennon, 1990) têm sido desenvolvidos com o objetivo fornecer opções de sensores para automação da irrigação. O carro chefe hoje são os tensiômetros equipados com transdutores de pressão, que interagem com conversores analógico/digital fazendo a comunicação com microprocessadores. Para se ter uma idéia, hoje um transdutor de pressão do tipo que é utilizado nos tensiômetros chega ao mercado brasileiro por aproximadamente US\$ 25,00 a unidade.

2.3.3 Número de tensiômetros e local de instalação

O fabricante do tensiômetro digital Water Control S/C recomenda a utilização de pelo menos 15 tensiômetros em cada área homogênea em termos de solo, variedade, idade e manejo da irrigação (5 pontos de amostragem em 3 profundidades), não importando o tamanho da área.

Silveira & Stone (2001) recomendam a instalação de três baterias de tensiômetros na área irrigada. Para o sistema pivô central os autores recomendam que as baterias sejam instaladas a 4/10, 7/10 e 9/10 do raio do pivô central, em linha reta a partir da base (torre), escolhendo pontos representativos da área.

Faria & Costa (1987) recomendam, para o sistema de gotejamento, uma bateria instalada a 0,3 – 0,45 m do gotejador, desde que haja uniformidade de solo e cultura. Para o sistema pivô central os autores sugerem duas baterias, uma a 180° de giro e outra um pouco antes de 360° de giro, ambas localizadas entre a segunda e a terceira torres externas. Em sistemas autopropelido e aspersão convencional recomendam-se duas baterias, uma entre a segunda e a terceira posições e outra entre a penúltima e a última posições de mudança. Segundo os mesmos autores, para o sistema de aspersão fixo, uma bateria é suficiente; em áreas irrigadas por sulco, deve-se usar uma bateria no início e outra no final do



sulco representativo da área. O número de tensiômetros por bateria depende da profundidade efetiva do sistema radicular.

Santana et al. (2001), trabalhando com pimentão cultivado em vaso de 13 L, utilizaram, para manejo da irrigação, três baterias de tensiômetros, sendo instalados dois em cada vaso: um a 10 cm e outro a 20 cm de profundidade. Os autores verificaram eficiência no monitoramento da água no solo.

Queiroz et al. (2000), trabalhando com alface americana cultivada em vaso de 7 L, utilizaram um tensiômetro por vaso, instalado a 12 cm de profundidade. Foram usados três tensiômetros por tratamento, sendo um em cada vaso, distribuídos aleatoriamente.

2.4 Capacidade de campo (Cc)

O termo “Capacidade de campo” descreve a condição de movimento da água livre no solo sob a ação da gravidade, com sentido vertical para baixo e intensidade muito lenta ou nula (Bernardo, 1995), o que equivale a dizer que não há variação da umidade (θ) com o tempo (T), ou seja, $\partial\theta/\partial T = 0$ (Carvalho et al., 1996). Este é um conceito arbitrário e não uma propriedade física do solo.

Tentativas de definição do conceito através de parâmetros estáticos (potenciais da água, granulometria, porosidade, etc.) não atingem uma relação plenamente aceitável devido ao desencontro dos resultados obtidos por diversos autores em diferentes tipos de solos. A capacidade de campo (Cc) é um conceito ideal de um estado de energia transitório e dinâmico, fundamentalmente um ponto de equilíbrio da relação água-solo (Carvalho et al., 1996).

Segundo Bernardo (1995), a tensão considerada equivalente à “Cc” é de 10 kPa em solos de textura grossa e de 33 kPa em solos de textura fina. Para Reichardt (1988), deve-se optar por tensões matriciais menores, da ordem de 6 a 10 kPa.

Na literatura existem recomendações de frequências fixas de irrigação para cada cultura. Embora possa ser prático no sentido de programação das operações, este método acarreta “déficits” e excessos de água, uma vez que as condições climáticas são variáveis ano a ano. Deste modo, há necessidade do uso de métodos de campo que determinem, direta ou indiretamente, a disponibilidade hídrica do solo para as culturas, de acordo com as condições ambientais predominantes durante o desenvolvimento das plantas (Faria & Costa, 1987).

Nos sistemas de irrigação em jardins, é comum a adoção de controle automático da irrigação com o uso de “timer”, equipamento que promove a abertura de válvulas ou o acionamento de moto-bombas em períodos de tempo pré-determinados. Entretanto, estes equipamentos não levam em consideração a umidade do solo ou outra variável qualquer (Silva et al., 2001).

Segundo Gervásio et al. (2001), no mercado existem diversos controladores: os mais simples possuem custo de aquisição relativamente baixo, são capazes de controlar um menor número de válvulas e, geralmente, são aplicados em projetos de pequeno porte; por outro lado, os modelos sofisticados são demasiadamente caros, o que dificulta a obtenção de uma relação benefício-custo favorável ao irrigante.

Queiroz et al. (2002) desenvolveram um circuito eletrônico digital, baseado na Álgebra de Boole, capaz de realizar o manejo automático de sistemas de irrigação a partir de sinais elétricos emitidos por tensiômetros de mercúrio. Os autores concluíram que o circuito proposto tem potencial para utilização em campo e sugerem a substituição do vacuômetro de mercúrio pelo de Bourdon.

Medice (1997) propõe um sistema de automação da irrigação utilizando tensiômetro de mercúrio e cita como vantagens a economia de mão-de-obra, o baixo custo de fabricação e manutenção e a otimização do emprego dos recursos hídricos.

provocar a irrigação excessiva do solo, causando a lixiviação, ou irrigação deficiente, e permitindo que se esgote uma grande parcela da água disponível armazenada entre uma irrigação e outra (Medice, 1997).

Segundo Shock (1998), do ponto de vista prático da engenharia, a instrumentação para medida da umidade do solo pode nortear o manejo da irrigação, ajudando a assegurar a produção econômica no curto prazo e, no longo prazo, a proteção ambiental. O mesmo autor ainda relata que a automação da irrigação pode ser conseguida usando uma combinação de sensores de umidade do solo, registradores de dados, controladores, válvulas solenóides, válvulas mecânicas e fonte pressurizada de água.

Botrel & Souza (2002) acrescentam que na indústria eletrônica existem muitos componentes, sensores e microcontroladores que podem ser úteis à irrigação. Cabe aos técnicos da área identificar como e onde esses avanços podem ser utilizados.

O manejo da irrigação com base no potencial de água no solo é a maneira mais racional de uso da água (Villagra, 1988) e, para determinação do potencial mátrico em condições de campo, o tensiômetro é o equipamento mais utilizado e recomendado (Villagra, 1988; Klein, 2001). Em países onde o nível técnico da irrigação é alto, o tensiômetro é bastante usado, principalmente onde o controle da irrigação é automático (Bernardo, 1995).

2.6 Controladores automáticos de irrigação

Muitos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver metodologias de automação de sistemas de irrigação com baixo custo, como os de Queiroz et al. (2002), Gervasio et al. (2001), Silva et al. (2001) e Médice (1997), entre outros.

Na literatura existem recomendações de frequências fixas de irrigação para cada cultura. Embora possa ser prático no sentido de programação das operações, este método acarreta “déficits” e excessos de água, uma vez que as condições climáticas são variáveis ano a ano. Deste modo, há necessidade do uso de métodos de campo que determinem, direta ou indiretamente, a disponibilidade hídrica do solo para as culturas, de acordo com as condições ambientais predominantes durante o desenvolvimento das plantas (Faria & Costa, 1987).

Nos sistemas de irrigação em jardins, é comum a adoção de controle automático da irrigação com o uso de “timer”, equipamento que promove a abertura de válvulas ou o acionamento de moto-bombas em períodos de tempo pré-determinados. Entretanto, estes equipamentos não levam em consideração a umidade do solo ou outra variável qualquer (Silva et al., 2001).

Segundo Gervásio et al. (2001), no mercado existem diversos controladores: os mais simples possuem custo de aquisição relativamente baixo, são capazes de controlar um menor número de válvulas e, geralmente, são aplicados em projetos de pequeno porte; por outro lado, os modelos sofisticados são demasiadamente caros, o que dificulta a obtenção de uma relação benefício-custo favorável ao irrigante.

Queiroz et al. (2002) desenvolveram um circuito eletrônico digital, baseado na Álgebra de Boole, capaz de realizar o manejo automático de sistemas de irrigação a partir de sinais elétricos emitidos por tensiômetros de mercúrio. Os autores concluíram que o circuito proposto tem potencial para utilização em campo e sugerem a substituição do vacuômetro de mercúrio pelo de Bourdon.

Medice (1997) propõe um sistema de automação da irrigação utilizando tensiômetro de mercúrio e cita como vantagens a economia de mão-de-obra, o baixo custo de fabricação e manutenção e a otimização do emprego dos recursos hídricos.

Sistemas automáticos aplicam-se muito bem aos sistemas de irrigação de experimentos garantindo a padronização do volume de água aplicado e a aplicação no momento correto atendendo as exigências das culturas dentro dos limites ideais recomendados, diminuindo inclusive o erro experimental.

O uso de sensores nos sistemas automáticos de controle em malha fechada é relativamente complicado do ponto de vista da instalação e manutenção dos mesmos em condições de campo devido ao grande número de operações com equipamento pesado, como por exemplo, a utilização de tratores. Todavia, é necessário que a pesquisa avance no sentido de desenvolver e disponibilizar metodologias alternativas e validar a eficiência do manejo automático da irrigação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e época do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do tipo pavilhão, próxima ao Laboratório de Irrigação e Hidráulica do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras/ MG, situado a 913,9 metros de altitude e com coordenadas geográficas 21° 14' de Latitude Sul e 45° 00' de Longitude Oeste de Greenwich (Brasil, 1992).

O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, o que caracteriza uma região subtropical com estiagem de inverno. Em termos anuais, a precipitação pluvial é de 1529,7 mm (Brasil, 1992).

O experimento teve início com a semeadura no inverno (10/6/2003) e término com a colheita na primavera (18/10/2003), totalizando um período de 130 dias.

3.2 Delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com sete repetições e esquema fatorial 3 x 4, composto por três métodos de manejo da irrigação e quatro tensões de água no solo. Cada parcela foi caracterizada por um vaso com três plantas de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.).

3.3 Tratamentos utilizados

As tensões matriciais de água no solo adotadas para indicar o momento de início das irrigações foram 15; 30; 45 e 60 kPa. Em um dos métodos de manejo automatizado empregaram-se tensiômetros com vacuômetro de mercúrio, aqui denominado “Hg”. O outro foi automatizado utilizando tensiômetros com vacuômetro de Bourdon e denominado “Vc”. E o último método de manejo utilizou tensiômetros convencionais para leitura com tensímetro digital portátil denominado “Ts”. Foram utilizados três tensiômetros por cada tratamento.

3.4 Construção e adaptação dos tensiômetros

Os tensiômetros utilizados no experimento foram construídos e testados no Laboratório de Irrigação do DEG.

Foram realizados testes em todos os tensiômetros com o objetivo de identificar supostos vazamentos e verificar a pressão de borbulhamento, seguindo a recomendação de Silveira & Stone (2001). Antes dos testes, os tensiômetros ficaram mergulhados em água destilada por mais de 24 horas para saturação da cápsula.

Durante os testes, os tensiômetros foram colocados dentro de uma caixa d'água e submetidos a uma tensão interna de 100 kPa com o auxílio de compressor, durante um minuto.

A Figura 1 mostra o desenho esquemático com os três tipos de tensiômetros utilizados.

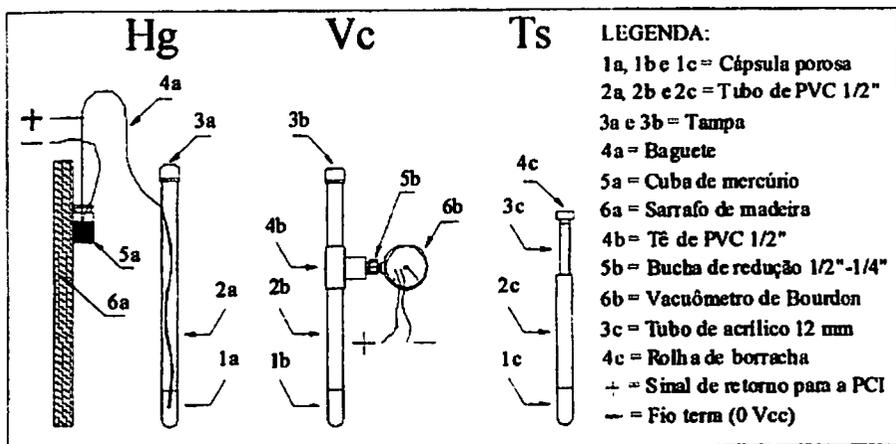


FIGURA 1: Esquema dos três tipos de tensiômetros utilizados no experimento.

Tanto os tensiômetros com vacuômetro de coluna de mercúrio quanto os de vacuômetro de Bourdon foram adaptados para funcionarem como sensores de umidade do solo e se comunicarem com o controlador de irrigação. Adaptou-se também o sistema de abertura para escorva (tampa).

3.4.1 Tampa

Convencionalmente, o tensiômetro de mercúrio utiliza uma rolha de borracha removível para dar acesso ao interior do tubo quando necessário. O tensiômetro de vacuômetro de Bourdon utiliza um tampão roscável de PVC, nos mais simples, ou tampa roscável de acrílico com vedação de borracha ou silicone nos mais modernos (importados).

Não é difícil encontrar o tampão de PVC roscável no mercado, mas para os demais casos citados pode ser necessário recorrer ao mercado especializado.

Para resolver esse problema de uma forma simples, barata e prática, foi feita uma adaptação utilizando bicos de garrafa plástica de refrigerante, os quais foram cortados e colados na parte superior dos tensiômetros (Figura 1) com cola epóxi. As vantagens desta adaptação são: facilidade de abertura do tensiômetro (roscável), baixo custo (material reciclável) e eficiência de vedação (anel de borracha interno).

3.4.2 Tensiômetro de mercúrio

No microtubo (baguete) do tensiômetro de mercúrio foi inserido um contato elétrico a uma altura determinada para cada tensão. Para isso foi feito um pequeno furo com auxílio de uma agulha, por onde se introduziu um fio de cobre de 0,3 mm de diâmetro.

Na junção externa do microtubo com o fio depositou-se uma gota de cola epóxi para fixar o fio e impedir o vazamento de água e/ou entrada de ar. O mercúrio responsável pelo fechamento do contato elétrico estava ligado ao fio terra da fonte de alimentação através da cuba. Neste esquema o contato elétrico inserido no microtubo funcionou como retorno de sinal.

A Figura 2 mostra um seguimento do baguete contendo o contato elétrico para ligação do tensiômetro ao circuito de controle.

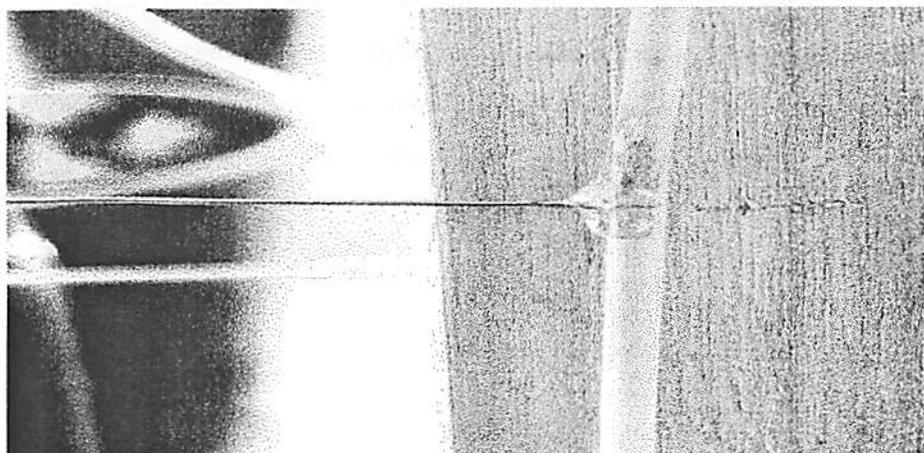


FIGURA 2: Detalhe do contato elétrico para o mercúrio inserido no bagueete.

Para os tensiômetros com vacuômetro de mercúrio foi utilizada uma haste de 1,2 m de altura, engastada num bloco de concreto de 0,25 x 0,25 x 0,25 m, na qual foi instalada a cuba de mercúrio de modo que o nível do mercúrio coincidissem com o nível do solo. A altura do mercúrio (H_{Hg}) no bagueete para cada nível de tensão definiu o ponto de inserção do contato elétrico e foi calculada utilizando a Equação 1.

$$H_{Hg} = \frac{\left(\frac{\Psi_m}{10,2}\right) - H}{-12,6} \dots\dots\dots(1)$$

em que:

H_{Hg} = Altura de mercúrio no bagueete, em m;

Ψ_m = Tensão matricial, em kPa;

H = Profundidade de instalação do tensiômetro, em m.

O valor 10,2 na equação é devido à transformação de m.c.a. para kPa.

3.4.3 Vacuômetro de Bourdon

Para a adaptação do vacuômetro de Bourdon utilizou-se o princípio dos contatos elétricos móveis ou girantes, formados por anéis coletores e escovas (usualmente usados em motores elétricos). Foram coladas, na tampa do vacuômetro (vidro superior), duas pistas (semi anéis coletores) de aço galvanizado com espessura de 0,5 mm. As mesmas foram polidas com lixa d'água número 600 até se obter o espelhamento da superfície.

Cada uma das pistas forma um setor circular com 135° e estas são separadas uma da outra por uma distância de 1 mm (Figura 3). O fundo de escala do vacuômetro utilizado ocupa um setor de 270° da circunferência equivalente a 760 mmHg, que corresponde a aproximadamente 100 kPa. A utilização de pistas com 135° deu uma margem de segurança de 50 kPa entre o acionamento de dois tensiômetros quaisquer do mesmo tratamento.

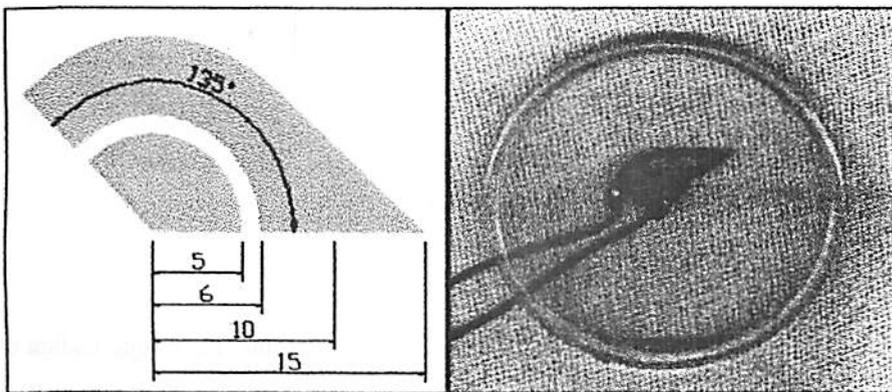


FIGURA 3: Detalhes das pistas e montagem sob a tampa do vacuômetro de Bourdon, medidas em mm.

Em cada pista foi soldado um cabo flexível de 0,3 mm². Usou-se a cor preta (anel interno) para o fio comum ligado ao terra da fonte e a cor vermelha (anel externo) para retorno de sinal para o controlador.

No ponteiro do vacuômetro foi fixado um sistema de mola com dois fios flexíveis (escovas) destinados a fechar o contato elétrico entre as duas pistas. As escovas, ao atingirem as pistas no ponto marcado para cada tensão, deslizam em contato com as mesmas, fechando o contato elétrico (Figura 4).

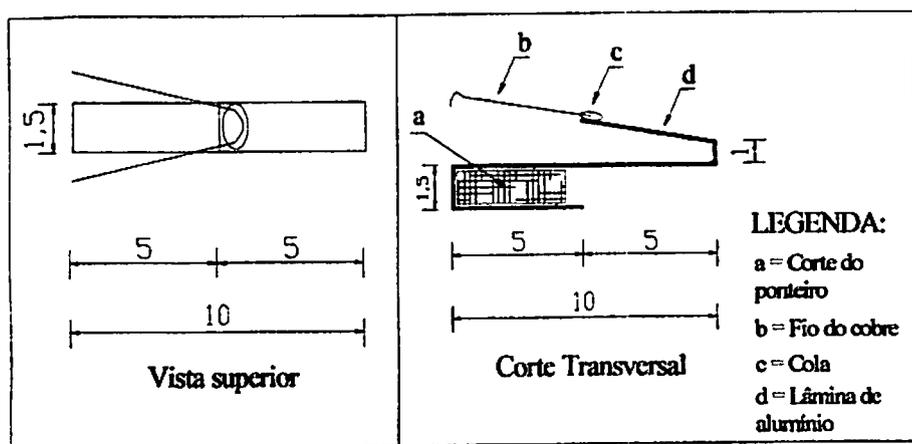


FIGURA 4: Desenho esquemático das escovas. Vista superior e corte transversal, medidas em mm.

No esquema adotado o tensiômetro funciona como chave liga/desliga e o contato elétrico fechado entre as pistas é entendido pelo controlador como sinal lógico binário em nível 1.

Vários materiais alternativos foram testados. O de melhor emprego para o sistema de mola foi uma lâmina de alumínio (lata descartável de refrigerante) com espessura de 0,1 mm, para os escovas, empregaram-se fios flexíveis de

cobre de 0,1 mm de diâmetro, os quais foram fixados à lâmina de alumínio utilizando cola de secagem instantânea, já que não há afinidade do alumínio com a solda fria de estanho.

Foram cortadas, com uma tesoura, lâminas de alumínio com 1,5 mm de largura e 22,5 mm de comprimento. As lâminas foram dobradas conforme é mostrado na Figura 4. Antes do corte, a lâmina de alumínio foi lixada para remover a tinta (externa) e o filme plástico (interno).

Os fios de cobre foram cortados com comprimento de 13 mm e dobrados ao meio. As suas extremidades foram dobradas para baixo, com um ângulo de 85° (Figura 4), para evitar que as pontas se prendessem nas pistas.

A mola com o coletor (escovas) foram fixados ao ponteiro do vacuômetro com cola epóxi a uma distância de 10 mm do eixo do ponteiro (Figura 5).

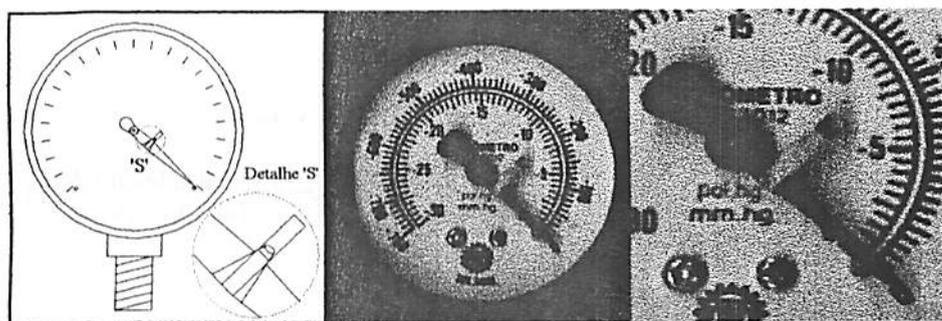


FIGURA 5: Detalhes do projeto das escovas e montagem no ponteiro do Vacuômetro de Bourdon.

3.5 Calibração do vacuômetro de Bourdon

Após adaptação dos vacuômetros de Bourdon, o funcionamento dos mesmos foi avaliado em laboratório. Para isso foi montada uma bancada de teste para que se pudesse comparar a leitura do vacuômetro de Bourdon, a leitura de vacuômetro de coluna de mercúrio e a de um tensímetro digital. Os três medidores de vácuo foram ligados em paralelo e submetidos à mesma tensão.

O vacuômetro de Bourdon adaptado foi ligado a um controlador idêntico ao que foi utilizado para controle da irrigação durante o experimento. Foi feita avaliação individual de cada vacuômetro, sendo as três entradas de sinal do controlador ligadas ao mesmo, permitindo o acionamento a partir de um único sinal (Figura 6).

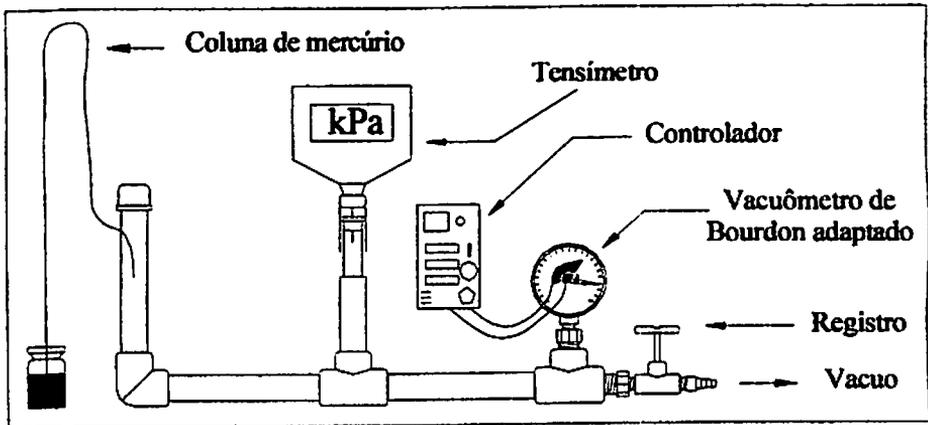


FIGURA 6: Bancada de teste montada para calibração dos vacuômetros de Bourdon adaptados.

A intensidade do vácuo foi controlada por um registro de alta precisão (registro para gás). A referência foi o tensímetro porque ele fornece leituras digitais e instantâneas. Desta forma, a tampa do vacuômetro de Bourdon,

contendo as pistas, foi ajustada na posição adequada para cada tensão definida para os tratamentos. A verificação da posição correta foi identificada pelo sinal de acionamento mostrado na placa do controlador pelo acendimento de um LED (Diodo Emitter Light). Depois de ajustada a posição correta da tampa contendo as pistas, a mesma foi fixada ao corpo do vacuômetro com fita adesiva de alta aderência.

Durante os testes também foi feita a comparação das leituras do tensiômetro com as leituras de um vacuômetro de coluna de mercúrio.

3.6 Instalação dos tensiômetros

As cápsulas dos tensiômetros permaneceram imersas em água por um período de 24 horas, antes que os mesmos fossem instalados.

Os tensiômetros foram instalados no centro do vaso, com a cápsula a 0,125 m da superfície do solo. Seguiram-se as recomendações de Silveira & Stone (2001) para a correta instalação dos tensiômetros.

Após a instalação, os tensiômetros destinados ao controle dos métodos Hg e Vc foram ligados ao circuito eletrônico. A ligação foi feita utilizando cabos flexíveis de 0,3 mm², utilizando uma cor para cada tensão (Verde = 15 kPa, Amarelo = 30 kPa, Azul = 45 kPa e Branco = 60 kPa). Foram utilizados dois fios de aterramento: um para o método Hg e outro para o método Vc, pois os circuitos de alimentação e controle foram independentes.

3.7 Controlador de irrigação

O controlador de irrigação utilizado foi o modelo proposto por Queiroz et al. (2002), utilizando o princípio de Medice (1997).

Foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso (PCI's) com 12 entradas de sinal (sensores = tensiômetros) e 4 saídas (atuadores = válvulas solenóides), cada uma de forma a atender as necessidades de automação e controle do atual experimento (Figura 7).

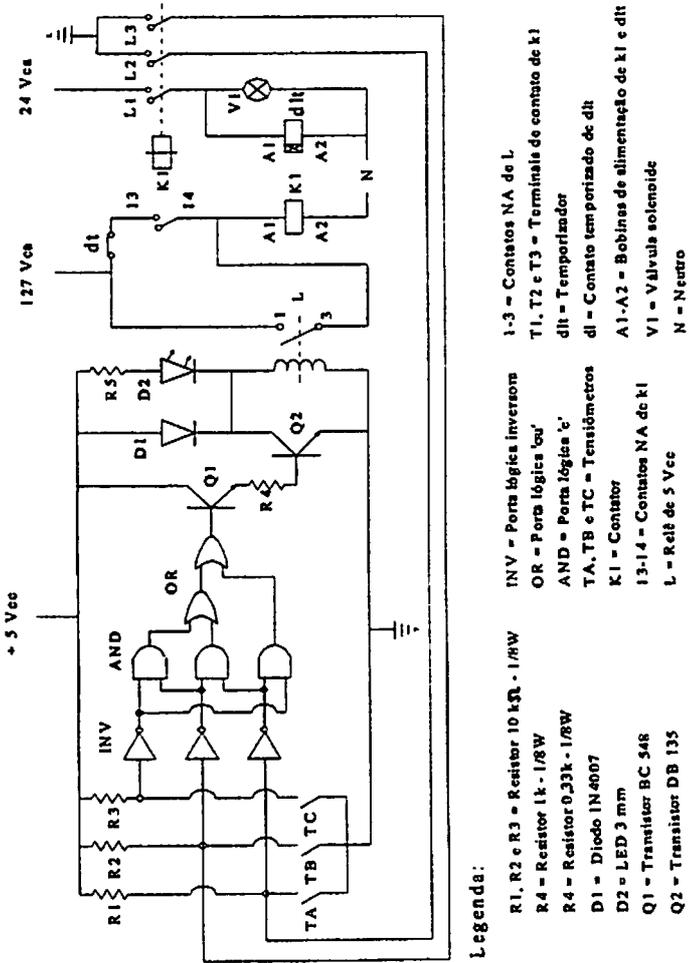


FIGURA 7: Diagrama do circuito utilizado para o controle automático do sistema de irrigação dos diversos tratamentos.

O circuito foi constituído basicamente por duas PCI's, duas fontes regulada de 5 Vcc, oito contadores e oito relês temporizadores (6 a 60 min). Os CI's utilizados são da família TTL ("Transistor Transistor Logic"). Este tipo de circuito eletrônico foi projetado para operar com uma tensão de alimentação de +5 Vcc (Volts em corrente continua).

Utilizou-se uma fonte regulada com ponte de diodos e duplo filtro capacitivo para alimentação do controlador. O projeto da fonte foi feito com base no diagrama sugerido por Braga (1999), seguindo as recomendações da National Corporation.

O circuito foi constituído basicamente pelas duas PCI's, duas fontes regulada de 5 Vcc, oito contadores e oito relês temporizadores (6 a 60 min). O diagrama de ligação foi mostrado na Figura 7.

3.7.1 Funcionamento do circuito

A parte digital do circuito é composta pelo controlador e seu funcionamento é baseado na interpretação booleana dos sinais elétricos enviados pelos tensiômetros. O projeto estabelece que o sinal de saída será positivo (nível 1) se, e somente se, pelo menos dois dos três tensiômetros estiverem indicando o momento da irrigação. Quando o momento da irrigação é identificado, um relé é acionado por meio do circuito digital e este liga o circuito analógico.

O circuito analógico é acionado através da alimentação da bobina do contator 'K1'. Após o primeiro pulso recebido do circuito digital o sistema é travado pelo contato de selo de K1. O relê temporizador é ligado em paralelo ao contator e interrompe o contato de selo após o tempo definido para cada tratamento, desligando o sistema (Figura 7).

A válvula solenóide foi alimentada pela primeira linha de contatos de K1. A segunda e terceira linhas foram usadas para substituir dois sensores

durante o período da irrigação. Desta forma, evitou-se que o circuito eletrônico fosse submetido a pulsos alternados e sucessivos devido à instabilidade dos sensores ao atingir a tensão de controle.

3.8 Solo utilizado no experimento

O solo, classificado como um Latossolo Vermelho Distroférico (Embrapa, 1999) de classe textural argilosa, foi coletado na camada subsuperficial (0,2 a 0,4 m de profundidade), no campus da UFLA, submetido a peneira com abertura de 4 mm² e, posteriormente, acondicionado em vasos de polietileno preto com capacidade de 13 litros. As análises química e física foram realizadas em duas amostras compostas representativas, enviadas aos Laboratórios de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da UFLA e ao Laboratório de Relação-Água-Solo-Planta do Departamento de Engenharia, respectivamente.

3.8.1 Análises físicas

Na Tabela 1 é apresentado o resultado da análise física para a classificação textural do solo utilizado no experimento.

TABELA 1: Granulometria e classificação textural do solo utilizado no experimento.

Identificação	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	Dag kg ⁻¹			
Amostra 1	14	29	57	Argilosa

Fonte: Laboratório de Física do Solo - DCS/UFLA.

Na Tabela 2 estão relacionados os resultados das análises para densidades de partícula e global, porosidade, volume de microporos e macroporos e condutividade hidráulica saturada, determinados com base nas metodologias citadas por Libardi (1999).

TABELA 2: Densidade de partículas (ρ_p), densidade global (ρ_g), porosidade (P), porcentagem de micro (Mi-p) e macroporos (Ma-p) e condutividade hidráulica saturada (K_0).

Identificação	ρ_p	ρ_g	P	Mi-p	Ma-p	K_0 m.dia ⁻¹
	g.cm ⁻³			%		
Amostra 2	2,54	0,906	64,33	54,83	45,17	21,84

Fonte: Laboratório de Relação Água-Solo-Planta – DEG/UFLA.

No Laboratório de Relação Água-Solo-Planta (LRASP/DEG) foi determinada a curva característica da água no solo (Figura 8), em que as linhas tracejadas indicam a faixa de tensão utilizada neste trabalho.

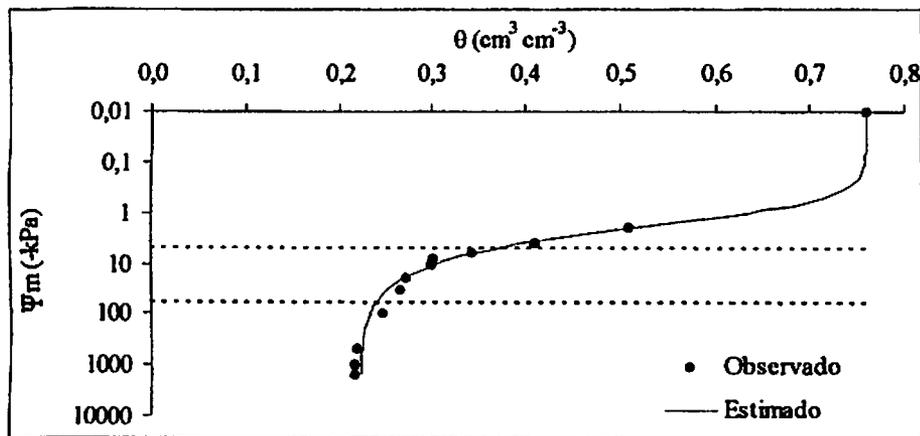


FIGURA 8: Curva característica do solo utilizado no experimento.

Utilizou-se uma bancada de funil de Haines para a determinação dos pontos de baixa tensão (2; 4; 6; 8; 10 kPa) e câmara de pressão de Richards para os pontos de maiores tensões (20; 33; 100; 500; 1000 e 1500 kPa). A umidade de saturação foi determinada com uma amostra saturada à pressão atmosférica.

Utilizou-se a ferramenta “Solver” do programa Microsoft Excel para ajustar os parâmetros da equação da curva de retenção segundo o modelo de van Genuchten (1980).

$$\theta = 0,223 + \frac{0,540}{\left[1 + (0,882 * \Psi_m)^{1,867}\right]^{0,465}} \quad (r^2 = 99,92\%) \dots\dots\dots(2)$$

em que:

θ = Umidade atual, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

Ψ_m = Tensão matricial, em kPa;

A capacidade de campo foi determinada em laboratório utilizando de três vasos idênticos aos utilizados no experimento (Figura 9).

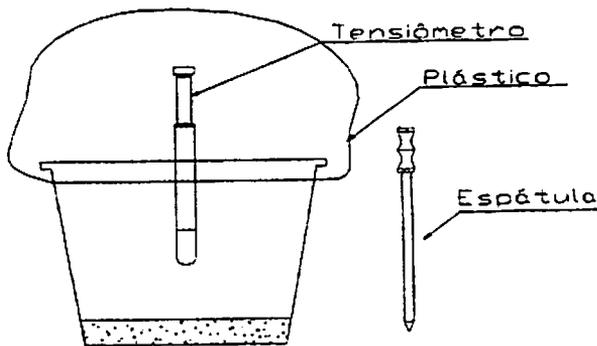


FIGURA 9: Representação esquemática do vaso utilizado para a determinação da capacidade de campo em laboratório.

O solo foi saturado com água e coberto com um saco plástico para evitar a evaporação. Foram retiradas amostras representativas do solo utilizando uma espátula para determinar a umidade pelo método padrão da estufa. A cada amostra retirada foi feita a leitura do potencial matricial a partir de um tensiômetro instalado no centro do vaso. Utilizou-se um tensímetro digital devidamente aferido e calibrado. Também foi feito um acompanhamento da variação do peso do vaso.

A variação da umidade foi acompanhada até se obter um valor constante, o que foi observado com 297 horas (12 dias e 9 horas) após a saturação (Figura 10). O valor de umidade na capacidade de campo encontrado foi de 43,35% para um potencial medido de 3 kPa.

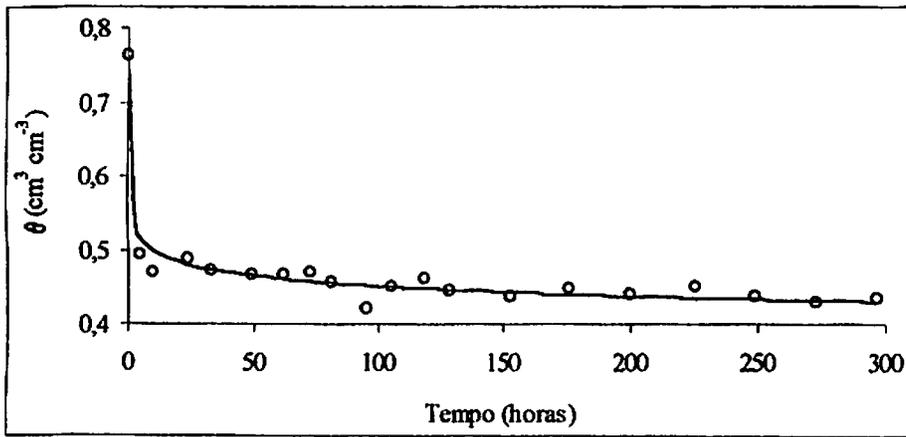


FIGURA 10: Pontos amostrados e equação ajustada para a determinação da capacidade de campo.

$$\theta = 0,5512 T^{-0,0435} \quad (r^2 = 94,93\%) \dots\dots\dots(3)$$

em que:

θ = Umidade volumétrica, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

T = Tempo, em hs.

3.8.2 Análise química

Os resultados da análise química estão resumidos na Tabela 3.

TABELA 3: Caracterização química do solo utilizado no experimento.

pH		P		K		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ²⁺	H+Al		
(H ₂ O)		mg.dm ⁻³		%		cmol _c .dm ⁻³					
6,7		0,6		14		3,0	0,2	0,0	1,7		
SB	(I)	(T)	V	m	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
cmol _c .dm ⁻³			%		mg.L ⁻¹	mg.dm ⁻³					
3,2	3,2	4,9	65,6	0	3,9	1,4	37,2	19,4	5,3	0,4	56

Fonte: Laboratório de Fertilidade do Solo – DCS/UFLA.

3.9 Instalação do experimento

O experimento foi montado em estufa do tipo pavilhão com estrutura metálica, cobertura de filme plástico, laterais fechadas com clarite e piso de concreto rústico, o qual foi previamente lavado com água e sabão e desinfetado com água sanitária na proporção de 1/10, ou seja, 1 L de água sanitária (2% Cl₂) para 10 de água. Posteriormente, efetuou-se a pintura do piso e das muretas com cal hidratada.

3.9.1 Preparo dos vasos

Foram utilizados vasos de polietileno com capacidade para 13 litros, sendo 12,14 litros ocupados com solo. No fundo do vaso foi colocado um disco

de tela de sombrite e, sobre este, uma camada de brita número dois (2), de aproximadamente 3,5 cm de espessura. Sobre a brita foi colocado outro disco de tela.

A brita teve por objetivo facilitar a drenagem de um possível excesso de irrigação. Em três vasos de cada tratamento foi instalado um sistema de dreno a fim de estimar o excesso de irrigação e permitir o balanço hídrico. O dreno foi constituído de um micro tubo de cobre com diâmetro interno de 5 mm (3/16") e comprimento de 0,05 m, fixado com cola epóxi, formando um ângulo de 30° com o fundo do vaso (Figura 11). O volume drenado foi direcionado para uma garrafa PET através de uma mangueira de plástico transparente de 6 mm (1/4") de diâmetro interno.

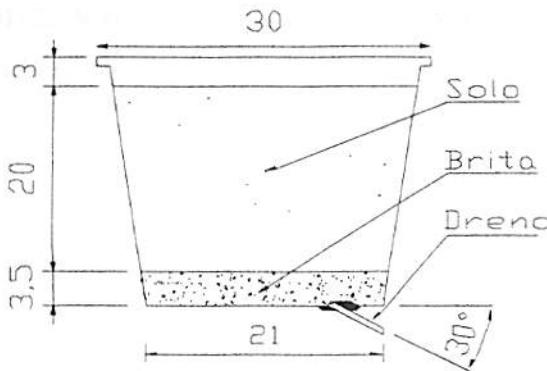


FIGURA 11: Representação do vaso utilizado no experimento com solo, brita e dreno; medidas em cm.

3.9.2 Sistema de irrigação

Utilizou-se um sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes modelo C.N.L./P.C.J. da marca NETAFIN, com vazão de 2,0

L h⁻¹. As linhas laterais partiam do cabeçal de controle, passando entre as fileiras duplas de modo a atender as duas fileiras. A ligação do gotejador à linha lateral foi feita com um microtubo flexível de 0,6 m de comprimento.

O cabeçal de controle foi composto por fonte de água pressurizada por gravidade e regulada em 25 m.c.a. de pressão. Foi instalada uma válvula solenóide para cada uma das 12 linhas laterais. No início de cada linha lateral dos tratamentos automáticos (Vc e Hg) foi instalado um hidrômetro modelo "AQUILA MNT, DN 20 mm".

Após a montagem do cabeçal de controle e do circuito eletro-eletrônico foi feita uma avaliação do sistema para verificar a uniformidade de vazão. Coletaram-se três volumes de cada gotejador, durante 10 minutos, para cada uma das 12 linhas laterais.

Foi calculado o Coeficiente de Uniformidade da Vazão (CUV) para cada linha lateral, utilizando a metodologia proposta por Cabello (1987). Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que os valores de uniformidade ficaram bem acima do limite mínimo aceitável, refletindo, inclusive, excelente uniformidade.

$$CUV = \left(\frac{q_{25}}{\bar{q}} \right) * 100 \dots\dots\dots(4)$$

em que:

- CUV = coeficiente de uniformidade de vazão;
- q₂₅ = média de ¼ das menores vazões;
- q̄ = média geral.

TABELA 4: Valores de CUV (%) determinados individualmente para a linha lateral de cada tratamento.

Método/tensão	15	30	45	60	Média
Hg	98,36	97,75	96,81	97,23	97,54
Vc	97,76	97,00	95,16	96,87	96,70
Ts	96,73	98,03	96,52	95,62	96,73
Média	97,62	97,59	96,16	96,57	97,00

3.9.3 "Layout"

Os vasos com as plantas foram dispostos em três fileiras duplas e duas simples, contendo cada uma 16 vasos, num total de 128 (Figura 12). As duas fileiras externas (simples), bem como o primeiro e o último vaso de cada fileira, foram destinados à bordadura. Os vasos foram colocados em cima de uma bancada feita com tábua (0,03 x 0,3 x 2,45 m) apoiada sobre tijolos.

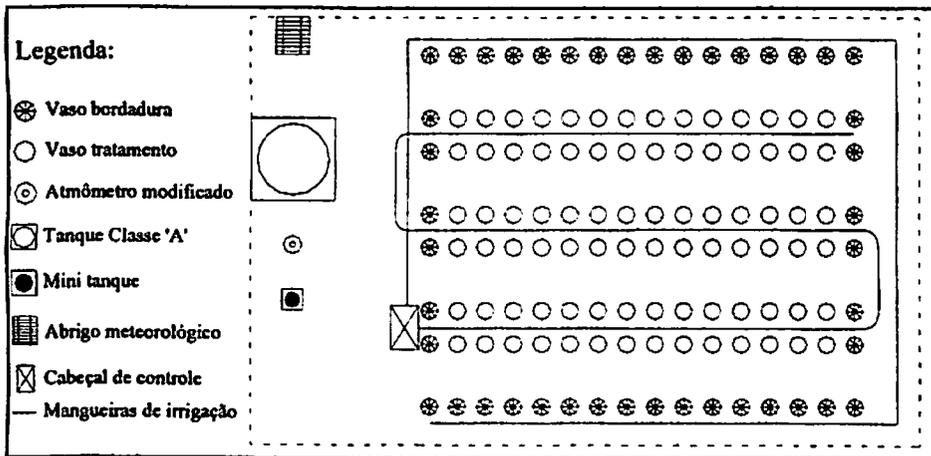


FIGURA 12: Croqui representativo da área experimental.

3.9.4 Semeadura e manejo inicial

Depois da distribuição dos vasos, montagem e teste do sistema de irrigação e controle (sistemas automatizados) foram semeadas, com o solo ligeiramente úmido, seis sementes em cada vaso, a uma profundidade de 2 cm, padronizado com o emprego de um gabarito.

Após a semeadura foi feita uma irrigação suficiente para saturar o solo. Após drenagem do excesso de irrigação, o solo permaneceu na capacidade de campo até a germinação e emergência das plântulas, o que ocorreu 8 dias após a semeadura (DAS).

Após a emergência das plântulas, o manejo da irrigação foi feito com base na tensão matricial lida com o tensímetro no tratamento Ts-15 (manejo manual) até os 25 DAS. O volume de água aplicado foi idêntico para todas as plantas, incluindo a bordadura.

Aos 14 DAS foi feito o desbaste, deixando-se as três melhores plantas de cada vaso e realizando, após o desbaste, a aplicação de micronutrientes.

Aos 25 DAS foi aplicado um volume de água suficiente para saturar o solo. Neste dia, o sistema eletro-eletrônico foi ligado e, a partir deste momento, a irrigação dos tratamentos Hg e Vc foi feita automaticamente pelo controlador. Para irrigação dos tratamentos Ts, acompanhou-se a variação da tensão de água no solo fazendo medições diárias com uso de um tensímetro digital.

3.10 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi feito com base na curva de retenção e na leitura de tensiômetros. Procedeu-se a irrigação toda vez que a tensão matricial de água no solo atingisse o valor estipulado para cada tratamento.

Inicialmente, pretendia-se irrigar até a capacidade de campo (3,18 kPa), todavia verificou-se que o tempo de irrigação necessário para aplicar o volume requerido para as tensões de 30, 45 e 60 kPa seria maior do que uma hora. Para diminuir o tempo de irrigação, foi fixada uma tensão limite (5 kPa) maior que a capacidade de campo. O volume de irrigação foi calculado pela Equação (5).

$$V = (\theta_c - \theta_T) * 12.140 \dots\dots\dots(5)$$

em que:

V = Volume de água de irrigação, em mL;

θ_c = Umidade de controle, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_T = Umidade no potencial do tratamento, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

O valor 12.140 da Equação 5 representa o volume de solo contido no vaso, em mL.

3.10.1 Irrigação no manejo convencional

Nos tratamentos de manejo convencional (“TS”) foi feita a leitura do potencial matricial todos os dias, às 17:00 horas (± 30 min), utilizando um tensímetro digital portátil. A irrigação foi efetuada toda vez que pelo menos dois dos três tensiômetros indicaram tensão matricial igual ou maior que aquela definida para cada tratamento. As leituras do tensímetro foram corrigidas pela Equação 6.

$$\Psi_m = 0,098C - L \dots\dots\dots(6)$$

em que:

Ψ_m = Tensão matricial, em kPa;

C = Profundidade de instalação do tensiômetro, em cm;

L = Leitura do tensímetro, em kPa.

A umidade atual foi calculada através da equação da curva característica (Equação 2), utilizando-se a média aritmética das três leituras de tensão matricial corrigidas pela Equação 6. Quando se observou valor muito distante da média, ele foi desconsiderado. O volume de água foi calculado utilizando a Equação 5.

O tempo de aplicação foi monitorado por um controlador automático programável da marca Rain-Bird, modelo ESP 12 LX PLUS. A programação foi feita todos os dias, após a leitura dos tensiômetros e o cálculo do tempo necessário para se fazer a irrigação de cada tratamento.

As plantas da bordadura foram irrigadas com base na necessidade de irrigação calculada para o tratamento Ts-15 (Manejo da irrigação convencional e tensão matricial de 15 kPa).

3.10.2 Irrigação automatizada

Tanto os tratamentos Hg quanto os Vc foram irrigados automaticamente. O procedimento para cálculo do volume de água a ser aplicado foi o mesmo adotado para a irrigação convencional. Apenas a definição do momento da irrigação é que foi automática, baseada no sinal enviado pelo conjunto dos três tensiômetros de cada tratamento. A umidade atual (θ_T) foi calculada a partir da tensão matricial média obtida com a equação lógica do circuito utilizado (Equação 7).

$$\Psi_m = (\Psi_1 * \Psi_2 + \Psi_1 * \Psi_3 + \Psi_2 * \Psi_3) \dots \dots \dots (7)$$

em que:

Ψ_m = Tensão matricial média, em kPa;

Ψ_1 , Ψ_2 e Ψ_3 = Tensão matricial de cada tensiômetro do mesmo tratamento, em kPa.

O tempo de irrigação foi definido com base no volume a ser aplicado e na vazão média de cada linha lateral dos seus respectivos tratamentos. Este tempo foi determinado por meio de um relê temporizador que desligava o sistema após o tempo estipulado. Caso o volume de água aplicado não fosse suficiente para permitir a queda da tensão durante o tempo de irrigação, o sistema poderia repetir o ciclo e fazer uma nova irrigação.

3.11 Custo

Para determinação dos custos foram utilizados preços de varejo dos materiais empregados na construção dos tensiômetros, controlador, fonte de alimentação e circuito de potência.

3.11.1 Tensiômetro com vacuômetro de mercúrio

Foram utilizados tubos de PVC branco 12 mm ($\frac{1}{2}$ "), cápsulas cerâmicas nacionais produzidas pela Cerâmica Vera Cruz, microtubo de Nylon (bague) e cola epóxi. Para haste utilizou-se um sarrafo de madeira de 1,2 m engastado num bloco de concreto. A cuba para o mercúrio foi feita com um recipiente de vidro de 15 mL. Utilizaram-se 10 mL de mercúrio para cada tensiômetro. A tampa do tensiômetro foi feita de material reciclado de garrafas de refrigerante. Para o eletrodo, responsável pelo contato elétrico, utilizou-se fio de cobre de 0,3 mm de diâmetro. O custo total de cada tensiômetro foi de R\$ 98,77, considerando inclusive a mão-de-obra.

3.11.2 Tensiômetro com vacuômetro de Bourdon

Foram utilizados tubos de PVC branco 12 mm, Tê de PVC 12 mm, cápsulas cerâmicas nacionais, bucha de redução 12 mm / 6 mm (1/2"-1/4") (latão), vacuômetro nacional da marca Salvi Casagrande, fita veda-rosca e cola epóxi. Para a adaptação do contato elétrico, utilizou-se lata de alumínio (refrigerante), fio de cobre de 0,1 mm de diâmetro, chapa galvanizada de 0,5 mm de espessura e cola. O custo total de cada tensiômetro foi de R\$ 73,24, considerando também a mão-de-obra.

3.11.3 Tensiômetro convencional (tensímetro)

Foram utilizados tubos de PVC branco 12 mm, cápsulas cerâmicas nacionais da Cerâmica Vera Cruz, tubo de acrílico 8 mm de diâmetro, rolha de borracha e cola epóxi. O custo total de cada tensiômetro foi de R\$ 55,27, considerando também a mão-de-obra.

3.11.4 Controlador

Foram utilizados componentes eletrônicos discretos como resistor, capacitor, transistor, diodo, LED (diodo emitter light), relê e circuitos integrados da família TTL (transistor transistor logic). Os componentes foram fixados em placa de circuito impresso (PCI). O custo total foi de R\$ 83,53, incluindo a mão-de-obra e a solda.

3.11.5 Fonte regulada

Para a confecção da fonte utilizaram-se diodo, resistor, capacitor eletrolítico e cerâmico, regulador de tensão, PCI e transformador. O trocador de calor utilizado no regulador de tensão foi confeccionado com lâminas paralelas de alumínio (lata de refrigerante). O custo total foi de R\$ 26,06, incluindo a mão-de-obra e a solda.

3.11.6 Circuito de potência

Para acionar o circuito de potência do sistema de irrigação a partir do controlador, utilizou-se um mini contator e um relê temporizador. O custo destes componentes no mercado varejista de Lavras é de R\$ 46,00 e R\$ 72,00, respectivamente.

3.12 Manutenção do sistema de manejo

Diariamente, às 17:00 hs +/- 30 min, foi observado o comportamento do controlador, verificando-se a ocorrência de irrigação em todos os tratamentos automatizados. Quando se detectou uma irrigação automática, registrou-se o volume aplicado no recipiente de controle (garrafa plástica ligada a um gotejador de cada linha lateral para aferição do volume aplicado) e a leitura do hidrômetro correspondente. Verificaram-se também os respectivos drenos para contabilizar o volume drenado.

Diariamente, no mesmo horário, foram feitas as leituras dos tensiômetros do método Ts a partir de um tensímetro digital portátil. A tensão

média foi calculada e o controlador foi programado para irrigação quando necessário.

A escorva dos tensiômetros de mercúrio foi feita toda vez que se detectaram bolhas de ar no baguete. O nível de água dos tensiômetros de vacuômetro mecânico foi verificado duas vezes por semana e repostado quando necessário. Nos tensiômetros convencionais observou-se a variação no nível d'água através do tudo de acrílico. O nível foi completado toda vez que se identificava depleção de 5 cm.

Durante o período experimental, diariamente às 17:00 hs, foi feito o monitoramento das condições ambientais do interior da estufa. As temperaturas diárias (máximas e mínimas) e umidades relativas do ar (máxima e mínima) foram coletadas a partir de uma mini estação climatológica eletrônica “Modelo Davis Perception II”. A mini estação ficou alojada em abrigo climatológico padrão dentro da estufa.

3.13 Cultivar de feijoeiro utilizada

Utilizou-se a cultivar BRS MG Talismã, pertencente ao tipo carioca, com hábito de crescimento indeterminado tipo III e porte prostrado. A sua floração média ocorre aos 44 dias após a emergência das plântulas e seu ciclo médio é de 85 dias. É resistente à antracnose e ao mosaico comum (Cultivar..., 2002).

As sementes utilizadas foram adquiridas no Departamento de Agricultura (DAG/UFLA), onde foram levadas ao Laboratório de Análise de Sementes para classificação através de peneiras padrões, já que no experimento foram usadas apenas sementes classificadas como peneira 12.

3.14 Semeadura e práticas culturais

A semeadura foi realizada em 10/6/2003, com seis sementes por vaso, à profundidade de 2 cm. No 8º dia após a germinação foi feito o desbaste, deixando apenas 3 plantas em cada vaso. Durante o período experimental foi feita capina manual nos vasos quando necessária.

Inspeções periódicas foram feitas a fim de detectar a presença de pragas e a ocorrência de doenças, bem como se fizeram avaliações visuais para detectar possíveis deficiências nutricionais das plantas. Estas informações foram empregadas na tomada de decisão sobre a necessidade de controle fitossanitário e correções nutricionais.

3.14.1 Tutoramento

Devido ao fato de a cultivar utilizada apresentar crescimento indeterminado, houve necessidade de construir um sistema de tutoramento sobre os vasos. Para isto foram fixados dois fios de arame galvanizado, a 0,65 m e 1,90 m do piso, amarrando-se a eles dois fitilhos de nylon, por onde se conduziu a gavinha da haste principal das plantas. Os fitilhos foram amarrados após o início da floração (Figura 13).

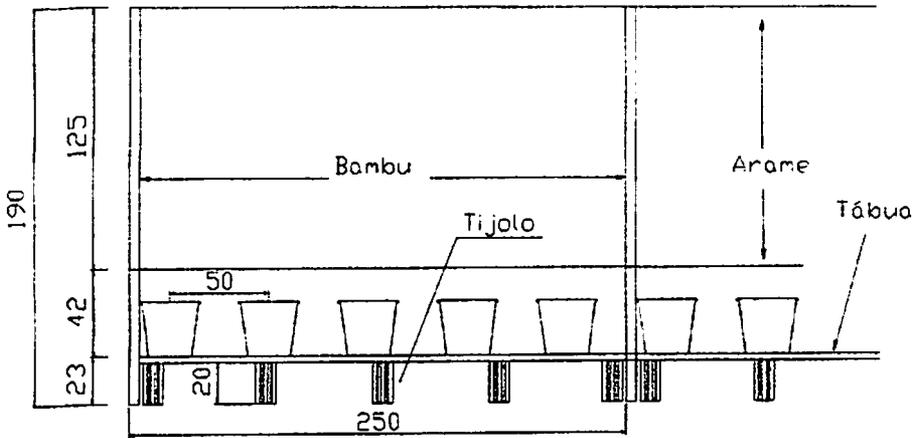


FIGURA 13: Representação do sistema de tutoramento, da bancada e localização dos vasos (desenho sem escala, medidas em cm).

3.14.2 Calagem e adubação

Utilizaram-se os métodos do alumínio trocável e saturação por bases para calcular a necessidade de calagem quando não houve necessidade de aplicação de calcário.

A adubação corretiva inicial, com NPK e magnésio (Tabela 5), foi feita um mês antes da semeadura, segundo recomendação de Malvoita (1980), sendo os fertilizantes misturados ao solo de forma homogênea. Conforme já mencionado (item 3.8.2), não houve necessidade de calagem.

TABELA 5: Fertilizantes e doses utilizadas de macronutrientes na adubação de base (pré-plantio).

Fertilizantes e seus respectivos teores	Nutriente	Dose	
		g/vaso ⁽¹⁾	mg L ⁻¹ ⁽²⁾
MAP (60 % P ₂ O ₅)	P	6,00	300
Nitrato de Cálcio (15,4% N)	N	3,90	50
Sulfato de Potássio (48% K ₂ O)	K	1,25	50
Sulfato de Magnésio (9% MgO)	Mg	4,00	30

⁽¹⁾ e ⁽²⁾ Dose do fertilizante e do nutriente, respectivamente.

A adubação com micronutrientes foi feita aos oito dias após a emergência (DAE) das plantas. Os fertilizantes utilizados (Tabela 6) foram dissolvidos em água e aplicados através de proveta, utilizando-se 100 mL de solução para cada vaso.

TABELA 6: Fertilizantes e doses utilizadas de micronutrientes na adubação de base (pós-plantio).

Fertilizantes e seus respectivos teores	Nutriente	Dose	
		g/vaso ⁽¹⁾	mg L ⁻¹ ⁽²⁾
Sulfato de Zinco (20% Zn)	Zn	0,300	5,0
Sulfato de Cobre (13% Cu)	Cu	0,138	1,5
Ácido Bórico (17% B)	B	0,035	0,5
Molibdato de Amônio (54% Mo)	Mo	0,002	0,1

⁽¹⁾ e ⁽²⁾ Dose do fertilizante e do nutriente, respectivamente.

As datas das adubações de cobertura são mostradas na Tabela 7. A partir dos 31 DAS (Dias Após Semeadura) promoveu-se a substituição da fonte de N para evitar maior alcalinização do solo. Nesta mesma data foi feita a aplicação foliar de Boro e Zinco, utilizando-se 0,1 g L⁻¹ de ácido bórico, 0,1 g L⁻¹ de sulfato de zinco e 0,2 g L⁻¹ de açúcar. O volume total aplicado nas plantas foi de 5 litros.

TABELA 7: Fertilizantes e doses utilizadas na adubação de cobertura.

DAS	Data	Fertilizante utilizado e seus respectivos teores	Dose	
			g/vaso ⁽¹⁾	mg.L ⁻¹ ⁽²⁾
18	28/Jun	Nitrato de Cálcio (15,4% N)	1,500	25
18	28/Jun	Sulfato de Potássio (48% K ₂ O)	0,500	20
27	07/Jul	Nitrato de Cálcio (15,4% N)	1,800	30
27	07/Jul	Sulfato de Potássio (48% K ₂ O)	0,625	25
31	11/Jul	Uréia (45 % N)	0,933	35
37	17/Jul	Uréia (45 % N)	0,400	15
37	17/Jul	Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	0,600	30
47	27/Jul	Uréia (45 % N)	1,333	30
47	27/Jul	Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	0,900	25
58	07/Ago	Uréia (45 % N)	1,333	50
58	07/Ago	Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	0,900	45
67	16/Ago	Uréia (45 % N)	1,333	50
67	16/Ago	Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	0,900	45
77	26/Ago	Uréia (45 % N)	0,800	30
77	26/Ago	Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	0,400	20
87	05/Set	Uréia (45 % N)	0,800	30
87	05/Set	Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	0,400	20

⁽¹⁾ e ⁽²⁾ Dose do fertilizante e do nutriente, respectivamente.

3.14.3 Controle fitossanitário

Aos 17 DAS observou-se a presença de mosca branca (*Bemisia tabaci* Genn.) em algumas plantas. Neste momento, foi feita a aplicação do inseticida imidacloprid-70%. No dia 24 DAS aplicou-se cyromazine-75% para combater a larva minadora ou minador (*Agromiza* sp.) e, juntamente com este inseticida, foi aplicada uma dose do fungicida mancozeb-80%, preventivamente (Tabela 8).

No final do ciclo observou-se a presença de oídio; no entanto, decidiu-se não fazer aplicação de defensivo, visto que já estava completo o processo de maturação dos grãos, não havendo risco de dano à produção do feijoeiro.

TABELA 8: Época de aplicação, defensivos e dosagens utilizadas.

D.A.S.	Data	Nome comercial	Princípio ativo	Dose (g L ⁻¹) ⁽¹⁾
17	27/Jun	Confidor GrDA	imidacloprid – 70%	1
24	24/Jul	Dithane PM	mancozeb – 80%	3
24	24/Jul	Trigard PM	cyromazine – 75%	0,15

⁽¹⁾ Dose expressa em gramas do produto comercial por litro de água.

3.15 Avaliações

Avaliou-se o desempenho dos tensiômetros e sua afinidade com o controlador e o funcionamento do controlador. Também foi medido o volume de água aplicado e avaliado seu efeito no crescimento e produtividade do feijoeiro nas diferentes tensões.

3.15.1 Tensiômetros

O funcionamento dos tensiômetros foi avaliado em relação à sua capacidade de funcionamento como sensor de umidade do solo e sua afinidade com o controlador de irrigação utilizado. Avaliou-se a eficiência e praticidade da tampa alternativa adaptada aos tensiômetros utilizados nos métodos Hg e VC. Também foi avaliado o desempenho dos contatos elétricos utilizados para comunicação dos sensores com o controlador. As falhas observadas foram contabilizadas.

As avaliações foram feitas a partir de observações visuais diárias dos tensiômetros e do controlador.

3.15.2 Controlador

O controlador foi avaliado em termos do seu funcionamento e precisão de controle.

3.15.3 Volume de água aplicado

Durante a determinação do coeficiente de uniformidade de vazão avaliou-se cada gotejador individualmente. Desta forma, pode se relacionar o volume médio do recipiente de controle (v_c) com o volume médio de cada gotejador (v_i), determinando um fator de correção ($k = v_i / v_c$).

Estimou-se o volume médio aplicado em cada parcela a partir do volume medido no recipiente de controle, obtendo-se 7 repetições, o que permitiu o tratamento estatístico dos dados. Mediu-se o volume de água aplicado por parcela para cada um dos 12 tratamentos.

3.15.4 Número de acionamentos ou irrigações

O número de irrigações foi contabilizado durante o ciclo. Para os tratamentos automáticos verificou-se o número de irrigações a partir do recipiente de controle. Para os tratamentos manuais o número de irrigações foi obtido a partir da planilha de manjço.

3.15.5 Crescimento

Quando se detectou o início da etapa R_6 - floração, ou seja, metade mais uma planta com pelo menos uma flor aberta (Fernandez et al., 1985), foi colhida

uma planta de cada vaso. As plantas retiradas foram escolhidas aleatoriamente e cortadas rente ao solo. As mesmas foram embaladas separadamente em saco de papel e secas em estufa a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 horas. Quando se observou peso constante, as plantas foram pesadas para obtenção do peso seco.

Mediu-se a altura da planta e o diâmetro do caule 30 dias após a emergência das plântulas (37 DAS), na floração (62 DAS) e 25 dias após a floração (87 DAS).

Os dados da 1ª e 2ª avaliações foram representados pela média de três plantas, enquanto na última avaliação utilizou-se a média de duas plantas.

A altura da planta foi medida com régua graduada (precisão de 0,001m), tomando-se como referência inferior a superfície do solo e superior, a inserção da última folha desenvolvida.

O diâmetro da haste principal foi medido com paquímetro digital (precisão de 0,001 mm), tomando-se como referência o colo da planta, três cm acima da superfície do solo.

3.15.6 Número de vagens por planta

Em virtude de a cultivar utilizada apresentar crescimento indeterminado, as vagens não amadureceram de forma uniforme. Para evitar a perda de grãos devido à deiscência das vagens, procedeu-se à colheita em duas fases. Foram colhidas as vagens secas (maduras) das duas plantas de cada parcela. Os dados obtidos foram expressos como o número médio de vagens das plantas de cada parcela (vaso).

3.15.7 Número de grãos por planta

Os grãos das vagens de cada parcela foram extraídos e contados. Os resultados obtidos foram expressos como número médio de grãos por planta de cada parcela.

3.15.8 Número de grãos por vagem

Foram contados todos os grãos, dividindo-se o resultado pelo número de vagens de cada parcela. Os dados obtidos foram expressos como o número médio de grãos por vagem para cada parcela.

3.15.9 Peso médio de 100 grãos

Como o número de grãos colhidos em cada parcela foi menor do que 100 unidades, obteve-se o peso de 100 grãos pela Equação 8.

$$P_{100} = \frac{100 * P_a}{N_{ga}} \dots\dots\dots(8)$$

em que:

P_{100} = Peso de 100 grãos, em g;

P_a = Peso da amostra, em g;

N_{ga} = Número de grãos da amostra.

O peso da amostra utilizado também foi corrigido para a umidade de 13% (b.s.).

3.15.10 Rendimento de grãos

Avaliou-se a produtividade de cada tratamento (g planta^{-1}) determinando o peso dos grãos secos, corrigido-o para a umidade padrão de 13 % (b.s.).

3.15.11 Eficiência de aplicação de água

O volume de água aplicado por parcela (estimado) foi relacionado com a produção total de cada parcela. Desta forma, obtiveram-se sete repetições de valores de eficiência de aplicação (kg m^{-3}) para cada tratamento, possibilitando o tratamento estatístico dos dados.

3.15.12 Eficiência de uso da água

Após cada irrigação (I) mediu-se o volume de água nos drenos (D) para determinar o consumo (C) de cada planta ($C = I - D$). O volume consumido foi relacionado com a produção total de cada parcela, permitindo o cálculo da eficiência de uso da água (kg m^{-3}).

3.16 Análises estatísticas

Os dados amostrais foram submetidos a um teste de normalidade de erro através do teste de Chapiro-Wilque, utilizando-se, para isso, o Software SAS.

Verificada a normalidade de erro para todas as variáveis, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Para comparação das médias dos métodos de manejo utilizou-se o teste de Tukey a 5% de significância, para os valores de tensão matricial, utilizou-se a análise de regressão a 5%.

As análises de variância, o teste de média e de regressão foram realizados utilizando-se o Software SISVAR for Windows, versão 4.0 (Ferreira, 2000). Os valores de número de vagens por planta, número de grãos por planta e número de grãos por vagem foram previamente transformados em $X^{0.5}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições internas da estufa

Na Figura 14 são mostradas as variações diárias das temperaturas, máximas e mínimas, bem como da sua média ($\{máxima + mínima\}/2$).

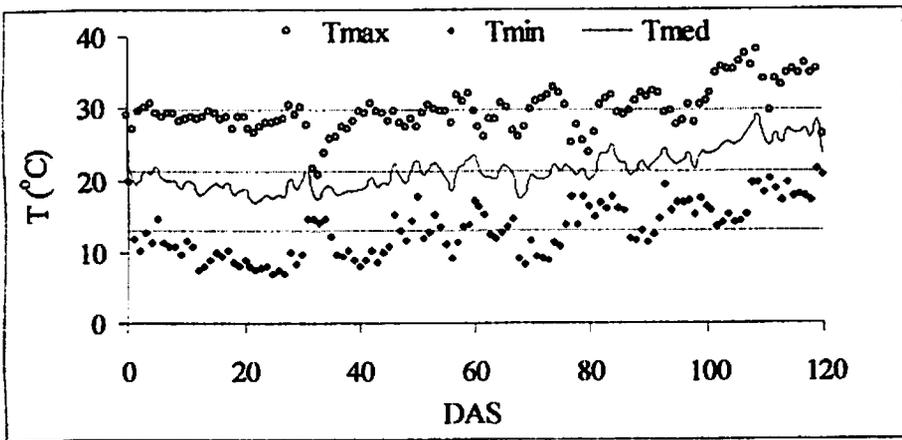


FIGURA 14: Temperaturas (T) máxima, mínima e média registradas no interior da estufa durante o período experimental.

Os valores médios das temperaturas máximas e mínimas observados no interior da estufa foram 29,73 e 13,74 °C, respectivamente. Quando se calcula a média das temperaturas médias ($\{máxima + mínima\}/2$) no período experimental, chega-se ao valor de 21,4 °C, o qual se aproxima da temperatura ideal para a cultura, 21 °C (Vieira, 1967 citado por Andrade, 1998).

No entanto observa-se, na Figura 14, que a amplitude da temperatura variou muito durante o ciclo de cultivo, o que pode ter afetado o desenvolvimento das plantas. Observa-se também que até 45 DAS a temperatura média foi sempre menor que 20 °C, sendo a mínima, em alguns dias, da ordem de 7 °C. Estes valores baixos de temperatura na fase inicial da cultura podem ter interferido de forma significativa no crescimento das plantas, visto que até a floração as plantas não haviam se desenvolvido de forma satisfatória.

Na Figura 15 são mostradas as variações diárias da umidade relativa máxima e mínima, bem como a sua média ($\{máxima + mínima\}/2$).

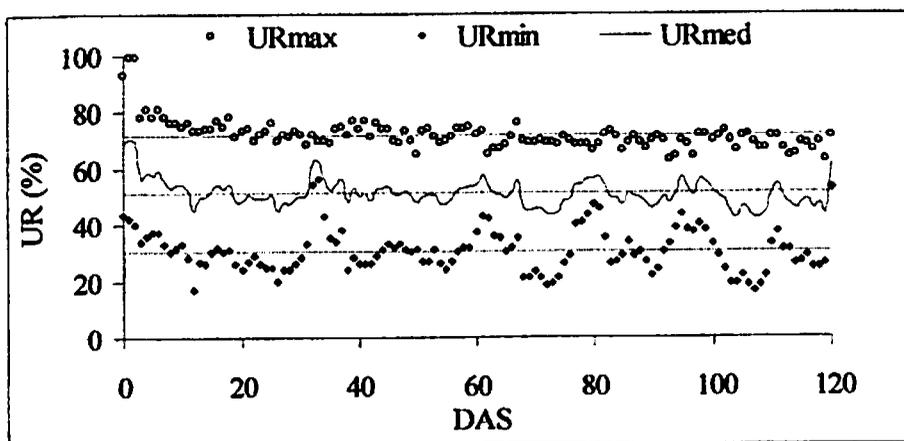


FIGURA 15: Umidades relativas (UR) máxima, mínima e média registradas no interior da estufa durante o período experimental.

Verifica-se que os valores da umidade relativa (máxima, mínima e média) oscilaram bastante durante o período experimental. A umidade relativa máxima registrada durante o experimento foi de 71,7%, sendo sempre menor que 80% e aproximadamente constante. Já a umidade relativa mínima foi em

média 31,6% e bastante variável, provocando alterações bruscas na amplitude. Cultivos em ambiente protegido são sensíveis à umidade relativa alta, a qual, combinada com altas temperaturas, favorecem a ocorrência de doenças, principalmente fúngicas e bacterianas. Neste ensaio não se observou o efeito negativo da umidade relativa sobre as plantas.

4.2 Funcionamento dos tensiômetros

4.2.1 Tampa alternativa

A observação diária permitiu concluir que a tampa de garrafa PET inserida no tubo do tensiômetro facilitou a escorva e não limitou a utilização do tensiômetro. Verificou-se apenas a necessidade de substituir a tampa devido ao anel de vedação interna, que se soltava provavelmente devido à exposição a radiação solar dentro da casa de vegetação. As substituições foram feitas a partir da décima semana de uso.

4.2.2 Tensiômetros de vacuômetro de mercúrio

Os tensiômetros de mercúrio apresentaram ótimo desempenho. Observou-se a formação de bolhas de ar na coluna de mercúrio, mas este é um acontecimento normal. Houve a necessidade de escorva para eliminação de bolhas a cada dois dias, em média. Silva et al. (2001), avaliando um sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação, e utilizando a metodologia de Medice (1997), verificaram a necessidade de escorva depois de três semanas. Entretanto, não utilizaram nenhuma cultura para acelerar a variação de umidade dos solos avaliados, o que pode ter contribuído para a manutenção das condições ideais por mais tempo. Santos (2002), trabalhando com sistema similar na

irrigação do pepino, verificou necessidade de escorvas periódicas para os tensiômetros submetidos a tensões maiores que 25 kPa.

O acúmulo de ar dentro do tensiômetro pode ser devido ao embolismo (Calbo & Silva, 2003), à formação de vapor d'água por conta da diminuição da pressão interna e ao oxigênio dissolvido, presente na própria água utilizada no interior do aparelho.

A estufa na qual se conduziu este trabalho fica a uma distância de 10 m da linha férrea. A vibração da estrutura, bem como dos vasos e tensiômetros, provocada pela passagem do trem, pode ter contribuído para a excessiva formação de bolhas. Foi observada a formação de minúsculas bolhas de ar que ficavam aderidas à parede interna do baguete. Acredita-se, a partir da observação visual diária, que a vibração favoreceu a concentração dessas micro bolhas na parte mais alta do baguete, interrompendo a coluna líquida.

Em relação ao contato elétrico inserido no baguete, verificou-se a formação de óxido de cobre, conforme citado por Silva et al. (2001). A partir da 10ª semana, houve necessidade de substituição de alguns eletrodos que foram danificados pela oxidação.

O volume de água consumido por cada tensiômetro durante o período experimental foi de 1,25 mL por dia, em média. A comparação deste volume médio com o volume médio consumido diariamente pelas plantas permite concluir que não houve contribuição significativa deste volume para o crescimento das plantas.

4.2.3 Tensiômetros de vacuômetro de Bourdon

Verificou-se que o mecanismo acoplado ao ponteiro do vacuômetro para desempenhar o papel de sensor não apresentou funcionamento adequado. O problema mais grave observado foi a falha no deslocamento do ponteiro após

uma irrigação. Notou-se que as escovas, depois do acionamento e irrigação, permaneciam aderidas às pistas por um tempo suficientemente grande para permitir o um novo acionamento. Desta forma, o ciclo de irrigação, em algumas ocasiões, foi repetido, duplicando o volume de água aplicado.

Isso pode ser explicado, provavelmente, em razão da força de atrito das escovas com as pistas se igualar à força da mola (mecanismo interno), dificultando o retorno do ponteiro após a irrigação.

Para este método fizeram-se a escorva e a reposição do nível d'água duas vezes por semana. O volume de água consumido por cada tensiômetro durante o período experimental (120 dias) foi de 1,88 mL por dia, em média.

4.2.4 Tensímetro

Este método não apresentou nenhum problema com relação às medições. A escorva foi feita toda vez que se observou o rebaixamento do nível d'água pelo tudo de acrílico. Houve a necessidade de substituição das rolhas de borracha dos tensiômetros 100 dias após o início do experimento.

O volume médio diário de água consumido por cada tensiômetro foi de 1,88 mL, em média.

Como a leitura foi feita diariamente (Figura 16), sempre no mesmo horário, foi possível, para este método, verificar que a tensão de água no solo deprimia bruscamente após a irrigação e a leitura feita uma vez por dia, no mesmo horário, não permitiu precisão na determinação do momento exato da irrigação. Todas as irrigações foram feitas com tensão acima dos valores estipulados para cada tratamento.

Na Figura 16 a linha horizontal tracejada representa a tensão de 15 kPa. Verifica-se que 100% das irrigações do tratamento Ts-15 foram feitas quando a tensão já havia ultrapassado o limite. Esta é uma consequência lógica do manejo

manual da irrigação e também foi observada nos demais tratamentos do método Ts.

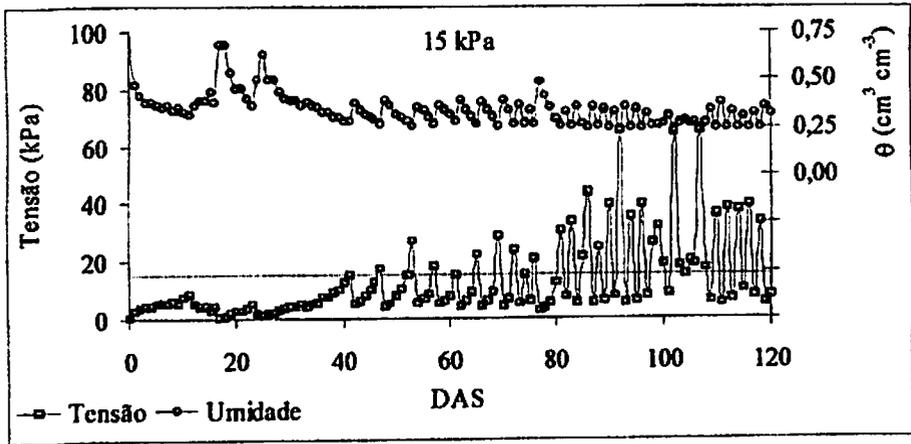


FIGURA 16: Variação da umidade do solo e da tensão matricial, durante o período experimental, para o tratamento Ts-15.

A tensão medida no momento da irrigação foi, em média, de 30,75; 50,89; 60,84 e 69,62 kPa nos tratamentos Ts-15; Ts-30; Ts-45 e Ts-60, respectivamente.

4.3 Funcionamento do controlador

Durante o período experimental foi observado que o controlador atingiu o objetivo esperado, apresentando excelente afinidade com os tensiômetros adaptados. Não foi constatada nenhuma falha nos sistemas elétrico e eletrônico, mostrando que o controlador pode ser utilizado com segurança.

4.4 Número de irrigações e turno de rega

Na Figura 17 são mostrados o número de acionamentos (irrigações) e o turno de rega (TR), registrados para cada método, nas diferentes tensões.

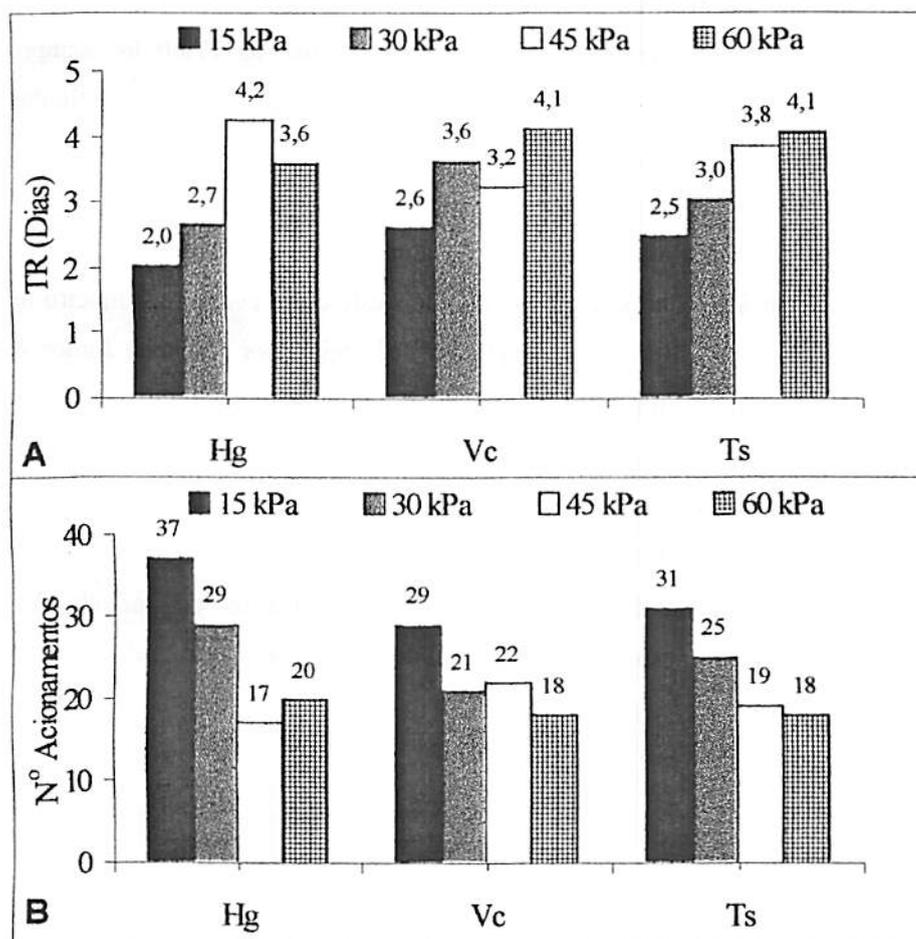


FIGURA 17: Número de irrigações (A) e turno de rega (B) registrados em cada tratamento.

O método Hg só não superou os demais na tensão de 45 kPa, o que pode indicar falhas nos tensiômetros destinados ao monitoramento da mesma, ou desenvolvimento deficiente das plantas deste tratamento (Hg-45).

O fato de o método Vc ter sido superado pelo Hg pode ser explicado pela melhor sensibilidade do tensiômetro de mercúrio, considerado padrão. Já o método Ts foi superado pela impossibilidade econômica de manter uma pessoa monitorando a variação da umidade (ou tensão) do solo em tempo integral. Como as leituras manuais foram feitas todos os dias às 17:00 hs, sempre efetuaram-se as irrigações com tensões superiores àquelas que foram definidas para cada tratamento detectando-se, desse modo, o momento de irrigação em um menor número de vezes, prolongando o turno de rega (Figura 17).

Foi verificada uma tendência de aumento do turno de rega com o aumento da tensão, o que já era esperado, pois este é um evento corriqueiro no manejo da irrigação. Resultado semelhante foi obtido por Luchiari Junior & Figueredo (1990), os quais também constataram redução na quantidade de água aplicada. A variação do turno de rega não foi idêntica à variação do número de acionamentos porque o intervalo entre a primeira e a última irrigação não foi constante ($74,5 \pm 2,5$ dias).

Quando se analisou o número de acionamentos do método Vc, observou-se que o mesmo apresentou falhas no acionamento, referentes às repetições do ciclo de irrigação (Figura 18).

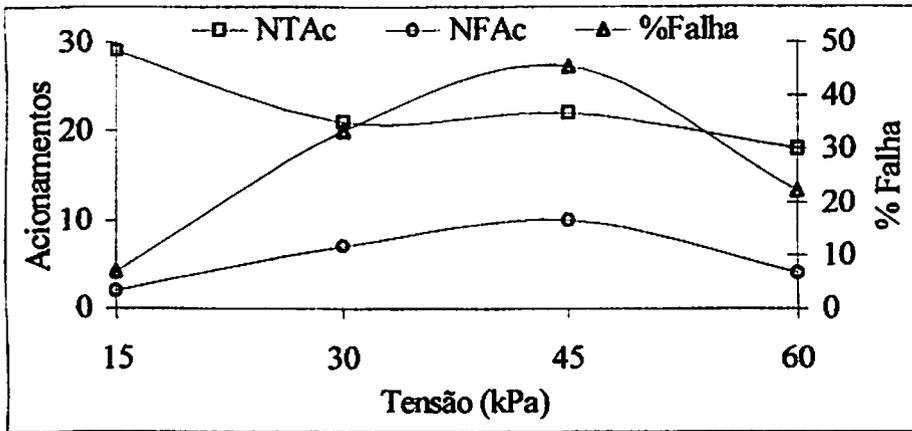


FIGURA 18: Número total de acionamentos (NTAc), Número de falhas no acionamento (NFAc) e Porcentagem de falhas (%) registradas no método Vc.

Pode-se explicar a ocorrência de falhas pela dificuldade de retorno do ponteiro do vacuômetro mecânico. As falhas foram detectadas pela observação do hidrômetro, do recipiente de controle e também pelo sistema de drenagem. Observa-se que o maior número de falhas foi verificado em tensões intermediárias, sendo a maior delas registrada na tensão de 45 kPa.

Em todas as falhas detectadas (em todas as tensões) foi verificado que o ciclo de irrigação se repetiu apenas uma vez, aplicando o dobro do volume de água estipulado para cada tensão. Isso pode indicar, além do que já foi discutido, que o vacuômetro mecânico apresenta sensibilidade retardada em relação ao vacuômetro de mercúrio.

Santos (2002), trabalhando com um sistema de irrigação automatizado similar, com a cultura do pepino cultivado em vasos de 13 litros, com latossolo vermelho muito argiloso, e sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes de vazão 3,16 L/h, utilizando tensiômetros de mercúrio,

observou que a coluna de mercúrio abaixava somente após 10 minutos do início da irrigação.

Considerando a condutividade hidráulica saturada de $21,84 \text{ m.dia}^{-1}$ (Tabela 2) e a profundidade da cápsula de $0,125 \text{ m}$, pode-se estimar que o tempo necessário para que a água atinja a cápsula a partir do início da irrigação é de $8,24 \text{ min}$, o que está de acordo com o resultado (10 min) obtido por Santos (2002).

4.5 Volume de água aplicado por irrigação

Na Figura 19 é mostrado o volume da água aplicado automaticamente pelo controlador em todas as irrigações do método Hg.

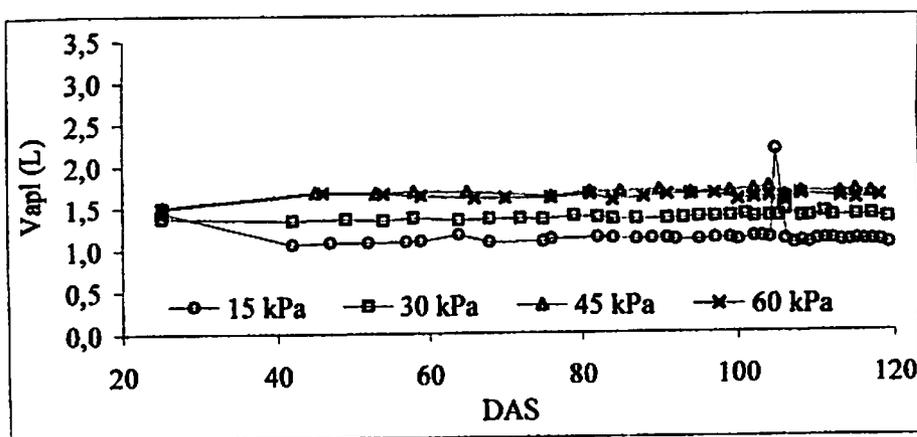


FIGURA 19: Volume de água aplicado pelo controlador (V_{apl}) durante o experimento para cada tensão no método Hg.

Verifica-se que houve linearidade nas aplicações, mostrando que o volume de irrigação foi praticamente constante. Este fato demonstra a eficiência

de aplicação do método e a sensibilidade do tensiômetro com vacuômetro de mercúrio, além de indicar a eficácia de comunicação do controlador com os sensores (tensiômetros), possibilitando a aplicação de água no momento certo.

Aos 105 DAS, o tratamento Hg-15 foi acionado duas vezes, como mostra o pico na curva 15 kPa da Figura 19. O duplo acionamento não foi tomado como falha, pois ocorreu em horários diferentes durante o dia, caracterizando apenas maior demanda de água pelas plantas neste dia. Apesar do maior volume detectado no hidrômetro e no recipiente de controle, não foi detectada água nos drenos, o que confirma a hipótese de duplo acionamento correto.

Os volumes aplicados para as tensões de 45 e 60 kPa foram praticamente idênticos, provavelmente devido à característica do solo utilizado no experimento.

Na Figura 20 é mostrada a variação da umidade volumétrica em função da tensão para os pontos de capacidade de campo (3,18 kPa), da tensão limite (5 kPa) e das tensões dos respectivos tratamentos (15, 30, 45 e 60 kPa). Entre as tensões dos tratamentos verificam-se valores de umidade praticamente constantes. Comparando os volumes de água necessários para rebaixar as tensões de 45 e 60 kPa para 5 kPa, verifica-se uma diferença de apenas 60 mL, o que equivale a 0,5% do volume total de armazenamento do solo. O tempo de aplicação de água estipulado para a tensão de 60 kPa foi de 1 min e 49 segundos maior que do que o tempo estipulado para a tensão de 45 kPa.

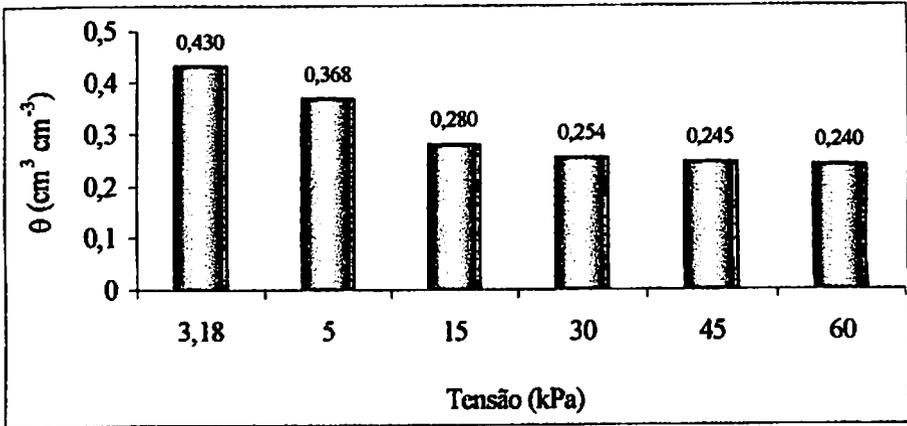


FIGURA 20: Comparação da variação da umidade do solo em função das tensões.

Os dados obtidos para o volume aplicado automaticamente pelo controlador no método Vc são bastante variáveis, mostrando que o vacuômetro de Bourdon apresentou muitas falhas.

Os picos ascendentes se devem às falhas mencionadas anteriormente no item 4.4 e mostradas na Figura 18. O pico descendente registrado aos 103 DAS pode ser explicado por uma possível queda de energia na rede, haja vista que o sistema não foi alimentado por bateria, ou também devido à queda temporária de pressão na adutora de alimentação, visto que o sistema foi pressurizado por gravidade.

Na Figura 21 é mostrado o volume aplicado automaticamente pelo controlador, em todas as irrigações do método Vc.

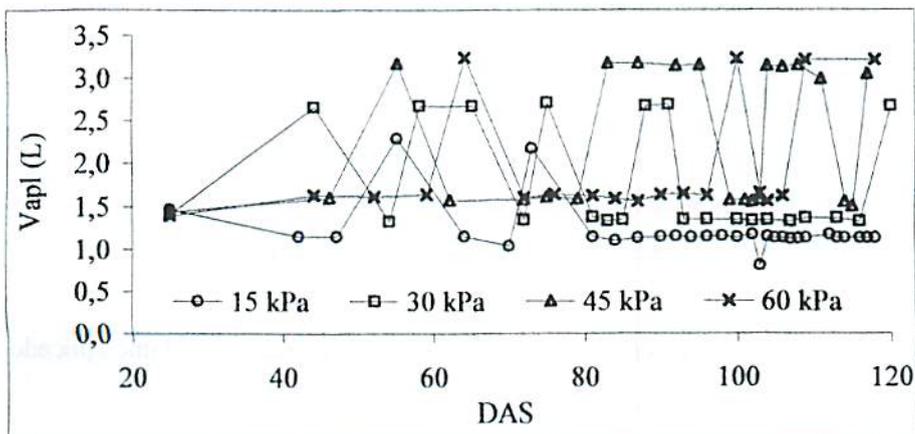


FIGURA 21: Volume de água aplicado pelo controlador (Vapl) durante o experimento para cada tensão no método Vc.

Na Figura 22 é mostrado o volume de água aplicado por vaso em cada tratamento do método Ts.

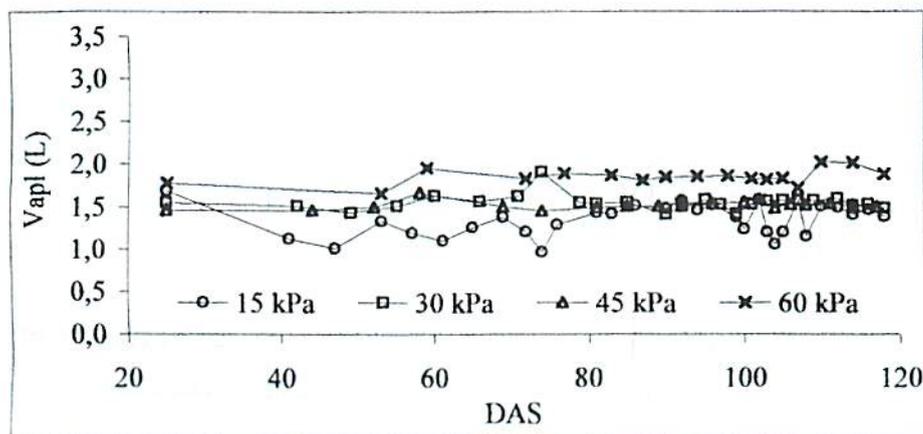


FIGURA 22: Volume de água aplicado (Vapl) durante o experimento para cada tensão no método Ts.

As variações observadas no volume aplicado foram devidas à imprecisão cometida ao se determinar a tensão matricial, a partir de leituras manuais, apenas uma vez por dia.

Todas as irrigações foram feitas com tensão acima daquela estipulada para os respectivos tratamentos, o que contribuiu para o aumento do volume aplicado e, conseqüentemente, também do tempo de irrigação, além de aumentar o turno de rega.

Na Figura 23 é mostrada, como exemplo, a variação do volume aplicado nos três métodos com a tensão de 15 kPa.

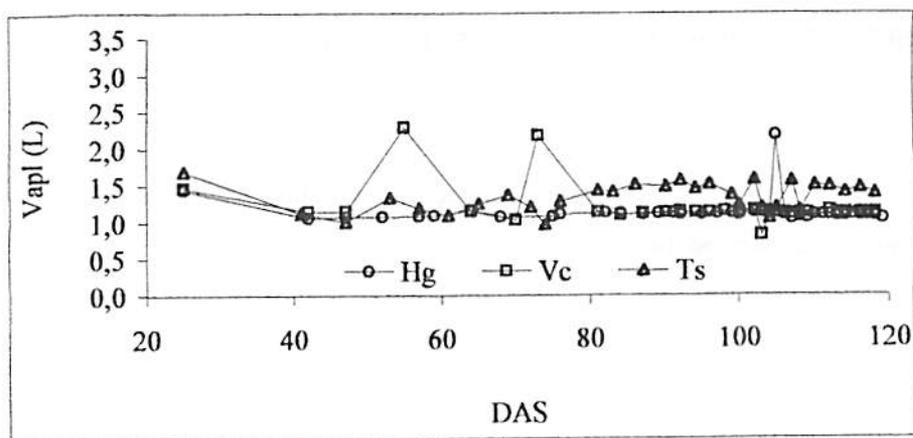


FIGURA 23: Volume de água aplicado (V_{apl}) durante o experimento para a tensão de 15 kPa nos três métodos de manejo.

Verifica-se que, apesar das falhas observadas, o método Vc (quando não falha) acompanha fielmente o método Hg, mostrando a necessidade de melhorar a adaptação do vacuômetro mecânico, o que redundaria em grande potencial para ser utilizado na determinação automática do momento de irrigar. Observa-

se também a variação dos volumes aplicados no método Ts, o que se deve à imprecisão da determinação da tensão manualmente.

4.6 Volume de água aplicado por vaso

Na Tabela 9 é mostrado um resumo da análise de variância dos dados relativos ao volume de água aplicado. Observa-se que houve significância, para todas as fontes de variação, ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

TABELA 9: Resumo da análise de variância dos dados relativos ao volume de água aplicado por vaso.

Fonte de variação	Grau de Liberdade (G.L.)	Quadrado Médio (Q.M.)
Método de manejo (M)	2	129,1430**
Tensão matricial (Ψ)	3	138,8855**
Interação (M x Ψ)	6	366,2476**
Resíduo	72	1,1667
Média geral		37,059
CV		2,91%

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

Na Tabela 10 são mostrados os valores médios do volume de água aplicado nos métodos de manejo, em cada tensão.

TABELA 10: Valores médios do volume de água aplicado por vaso (L) em cada método e tensão durante o experimento.

Método	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	41,87 b	41,08 b	28,83 a	32,60 a
Vc	34,69 a	37,58 a	50,20 b	35,61 b
Ts	41,08 b	38,84 a	28,52 a	33,81 a
Médias				

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Nas tensões mais baixas, de 15 e 30 kPa, o volume de água aplicado no método Vc foi inferior ao dos demais métodos, enquanto nas tensões de 45 e 60 kPa o método Vc aplicou mais água que os métodos Hg e Ts.

A diferença de volume aplicado na tensão 45 kPa no método Vc parece ter sido ditada em função das falhas observadas, o que teria provocando uma aplicação acentuada de água. Da mesma forma, a diminuição dos volumes aplicados nos tratamentos Hg-45 e Ts-45 pode estar mais relacionada com as exigências da cultivar de feijociro utilizada, pois tanto o método padrão (Hg) quanto o convencional (Ts) apresentaram menor consumo de água. Este menor volume é resultado do menor número de irrigações (Figura 17), o que reflete um maior intervalo entre irrigações, aumentando o efeito do déficit hídrico.

Observa-se que o volume aplicado nos métodos Hg e Ts foi igual para as tensões de 15, 45 e 60 kPa, sendo que, para a tensão de 30 kPa, o método Ts se igualou ao Vc, que é diferente dos demais nas outras tensões.

No método Ts as irrigações foram feitas com tensões maiores do que aquelas definidas como limite dos tratamentos, refletindo num maior volume aplicado por irrigação. No entanto, o número de acionamentos foi menor (Figura 17), o que explica a semelhança no volume total aplicado.

Na Figura 24 é mostrado o comportamento do volume aplicado em função da tensão matricial. Verifica-se que os volumes totais de água aplicados durante o ciclo pelos métodos Hg e Ts são quase idênticos e decrescem na medida em que se aumenta o déficit hídrico. Já o método Vc se distancia dos demais em relação a esta variável, principalmente no ponto de tensão 45 kPa, no qual se detectou maior número de falhas, redundando num maior volume aplicado.

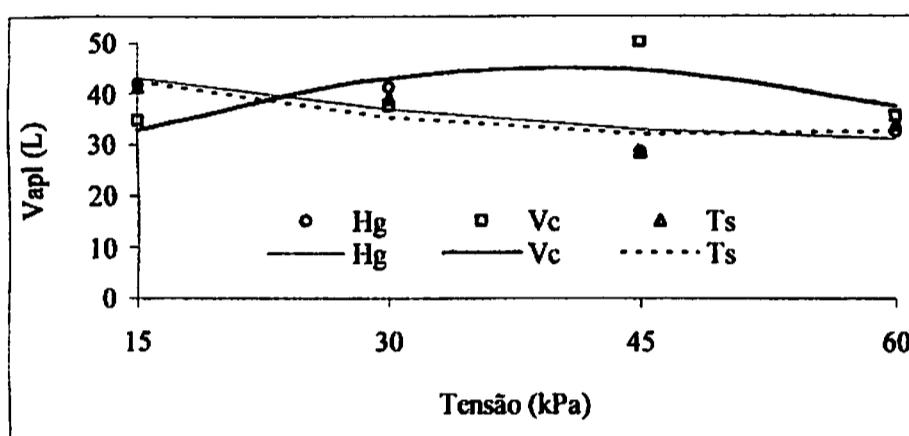


FIGURA 24: Volume de água aplicado (Vapl) por vaso no período de 25 a 120 DAS.

Na Tabela 11 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para cada método de manejo em função das tensões.

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Embora tenha havido significância para a fonte de variação tensão, o ajuste do modelo da curva de regressão não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 13 é mostrado o quadro de médias dos dados de matéria seca da parte aérea do feijociro, através do qual se confirma que os dados obtidos são praticamente idênticos. As possíveis razões para este resultado podem ser o efeito da temperatura (Figura 14) provocando o mau desenvolvimento das plantas e o efeito da elevação do pH, o que pode ter determinado o aparecimento de deficiências nutricionais nas plantas devido à inibição da absorção de micronutrientes. A observação visual permitiu verificar que as plantas não haviam se desenvolvido satisfatoriamente até a floração. A primeira irrigação, após o início da aplicação dos tratamentos (25 DAS), foi feita aos 41 DAS. O espaço de tempo decorrido (21 dias) entre o início das irrigações e a floração (62 DAS) pode não ter sido suficiente para que o efeito do déficit hídrico não se

TABELA 11: Coeficientes de ajuste dos modelos de volume de água aplicado (Vapl) por planta para cada método em função da tensão.

Método de manejo	Vapl (L) = a (Ψ) ² + b (Ψ) + c			r ² (%)
	a	b	c	
Hg**	0,00506	-0,64660	51,7989	69,36
Vc**	-0,01943	1,55955	13,8171	56,39
Ts**	0,00837	-0,84199	53,0146	70,14

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

Na Figura 17 verificou-se que o número de acionamentos do método Ts foi menor que o do Hg; no entanto, verifica-se, pela Figura 24, que o volume de água aplicado nestes dois métodos foi praticamente idêntico. Isto mostra que o aumento do turno de rega foi compensado pelo maior volume de água aplicado devido as maiores tensões medidas no método Ts.

4.7 Crescimento do feijoeiro

4.7.1 Matéria seca da parte aérea

Na Tabela 12 é apresentado um resumo da análise de variância dos dados relativos à matéria seca da parte aérea. Observa-se que a tensão matricial influenciou significativamente esta característica, mas não houve efeito nem do método de manejo e nem da interação tensão x método.

TABELA 13: Comparação de médias dos dados de matéria seca da parte aérea, medido no início da floração (62 DAS), pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Método	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	2,13	2,36	1,98	2,19
Vc	2,34	3,37	2,05	2,26
Ts	2,17	2,33	1,45	2,32
Médias	2,21	2,69	1,83	2,26

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Quando se promoveu a substituição da fonte de Nitrogênio (N) de nitrato de cálcio para uréia (31 DAS = 11/07/2003), verificou-se resposta das plantas em relação ao seu crescimento vegetativo. A partir do mês de julho verificou-se também uma tendência de elevação da temperatura média (Figura 14).

4.7.2 Altura da haste principal

Na Tabela 14 é apresentado um resumo das análises de variância para a altura da planta. A altura das planta foi influenciada pelas Tensões de água no solo, DAS, interações DAS x Tensões e DAS x Métodos x Tensões.

Na Figura 24 é mostrado o comportamento do volume aplicado em função da tensão matricial. Verifica-se que os volumes totais de água aplicados durante o ciclo pelos métodos Hg e Ts são quase idênticos e decrescem na medida em que se aumenta o déficit hídrico. Já o método Vc se distancia dos demais em relação a esta variável, principalmente no ponto de tensão 45 kPa, no qual se detectou maior número de falhas, redundando num maior volume aplicado.

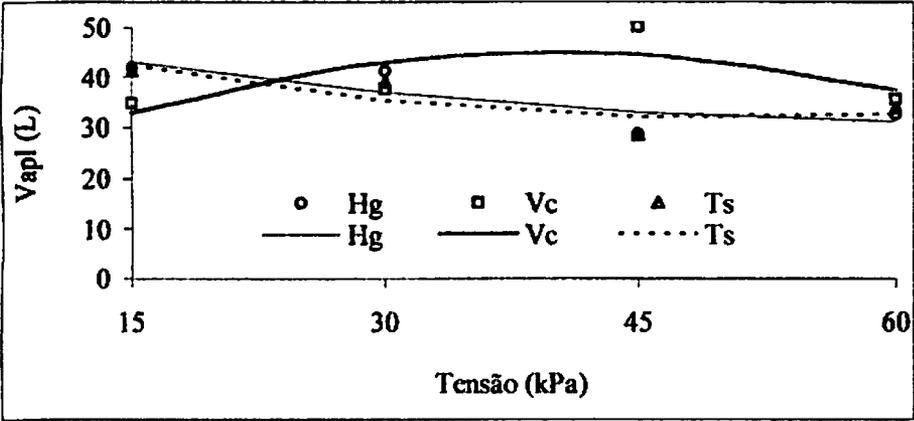


FIGURA 24: Volume de água aplicado (Vapl) por vaso no período de 25 a 120 DAS.

Na Tabela 11 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para cada método de manejo em função das tensões.

TABELA 11: Coeficientes de ajuste dos modelos de volume de água aplicado (Vapl) por planta para cada método em função da tensão.

Método de manejo	Vapl (L) = a (Ψ) ² + b (Ψ) + c			r ² (%)
	a	b	c	
Hg**	0,00506	-0,64660	51,7989	69,36
Vc**	-0,01943	1,55955	13,8171	56,39
Ts**	0,00837	-0,84199	53,0146	70,14

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

Na Figura 17 verificou-se que o número de acionamentos do método Ts foi menor que o do Hg; no entanto, verifica-se, pela Figura 24, que o volume de água aplicado nestes dois métodos foi praticamente idêntico. Isto mostra que o aumento do turno de rega foi compensado pelo maior volume de água aplicado devido as maiores tensões medidas no método Ts.

4.7 Crescimento do feijoeiro

4.7.1 Matéria seca da parte aérea

Na Tabela 12 é apresentado um resumo da análise de variância dos dados relativos à matéria seca da parte aérea. Observa-se que a tensão matricial influenciou significativamente esta característica, mas não houve efeito nem do método de manejo e nem da interação tensão x método.

TABELA 12: Resumo da análise de variância dos dados de matéria seca da parte aérea do feijoeiro.

Fonte de variação	G.L.	Q.M.
Método de manejo (M)	2	1,4798 ^{NS}
Tensão matricial (Ψ)	3	2,5950 ^{**}
Interação (M x Ψ)	6	0,6135 ^{NS}
Resíduo	72	0,4907
Média geral		2,2471
CV (%)		31,17

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

^{**} Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Embora tenha havido significância para a fonte de variação tensão, o ajuste do modelo da curva de regressão não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 13 é mostrado o quadro de médias dos dados de matéria seca da parte aérea do feijoeiro, através do qual se confirma que os dados obtidos são praticamente idênticos. As possíveis razões para este resultado podem ser o efeito da temperatura (Figura 14) provocando o mau desenvolvimento das plantas e o efeito da elevação do pH, o que pode ter determinado o aparecimento de deficiências nutricionais nas plantas devido à inibição da absorção de micronutrientes. A observação visual permitiu verificar que as plantas não haviam se desenvolvido satisfatoriamente até a floração. A primeira irrigação, após o início da aplicação dos tratamentos (25 DAS), foi feita aos 41 DAS. O espaço de tempo decorrido (21 dias) entre o início das irrigações e a floração (62 DAS) pode não ter sido suficiente para que o efeito do déficit hídrico não se manifestasse nas plantas.

TABELA 13: Comparação de médias dos dados de matéria seca da parte aérea, medido no início da floração (62 DAS), pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Método	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	2,13	2,36	1,98	2,19
Vc	2,34	3,37	2,05	2,26
Ts	2,17	2,33	1,45	2,32
Médias	2,21	2,69	1,83	2,26

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Quando se promoveu a substituição da fonte de Nitrogênio (N) de nitrato de cálcio para uréia (31 DAS = 11/07/2003), verificou-se resposta das plantas em relação ao seu crescimento vegetativo. A partir do mês de julho verificou-se também uma tendência de elevação da temperatura média (Figura 14).

4.7.2 Altura da haste principal

Na Tabela 14 é apresentado um resumo das análises de variância para a altura da planta. A altura das planta foi influenciada pelas Tensões de água no solo, DAS, interações DAS x Tensões e DAS x Métodos x Tensões.

TABELA 14: Resumo da análise de variância dos dados de altura da haste principal e diâmetro do caule.

Fonte de variação	G.L.	Q.M.	
		Altura (cm)	Diâmetro (mm)
Método de manejo (M)	2	7,7524 ^{NS}	0,0420 ^{NS}
Tensão matricial (Ψ)	3	435,6058**	0,1678 ^{NS}
Interação (M x Ψ)	6	157,1330 ^{NS}	0,2233*
Resíduo 1	72	76,4451	0,0790
DAS (D)	2	61729,4633**	27,1288**
Resíduo 2	18	29,0580	0,0570
Interação (D x M)	4	12,7261 ^{NS}	0,0681 ^{NS}
Interação (D x Ψ)	6	267,8292**	0,0765*
Interação (D x M x Ψ)	12	139,9829*	0,1342**
Resíduo 3	126	65,3250	0,0307
Média geral		26,62	3,85
CV 1 (%)		32,84	7,31
CV 2 (%)		20,25	6,21
CV 3 (%)		30,36	4,55

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** e *Significativo ao nível de 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Na Tabela 15 são mostradas as médias da altura da planta nas três datas de avaliação, para cada método de manejo, nas respectivas tensões. Os dados médios confirmam que os métodos de manejo não afetaram significativamente a altura do feijociro, até a floração (62 DAS), em nenhuma das tensões. Santos (2002), comparando dois métodos de manejo da irrigação (manual e automatizado) na cultura do pepino caipira, também verificou que o método de manejo não interferiu no crescimento das plantas, mostrando que o sistema de manejo automático pode ser utilizado sem restrições. O sistema automático utilizado por este autor é similar ao que foi utilizado no presente trabalho.

foi observado para a altura da haste principal, o que já era esperado, pois as duas características estão intimamente relacionadas.

Na Figura 26 é apresentado o comportamento do diâmetro da haste principal.

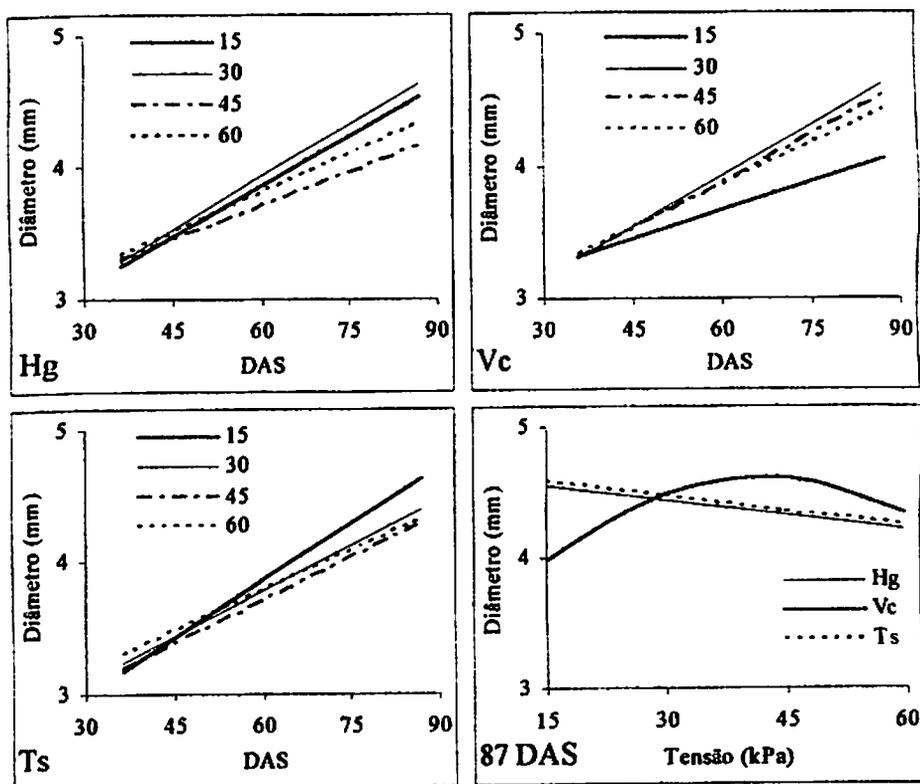


FIGURA 26: Estimativas do diâmetro da haste principal do feijociro em função da idade e tensões de água no solo, em diferentes métodos de manejo.

Observa-se, na Figura 26, que o diâmetro da haste principal apresenta uma tendência de crescimento linear, em função dos dias após semeadura, em todas as tensões avaliadas. Além da tendência linear, observa-se uma

TABELA 14: Resumo da análise de variância dos dados de altura da haste principal e diâmetro do caule.

Fonte de variação	G.L.	Q.M.	
		Altura (cm)	Diâmetro (mm)
Método de manejo (M)	2	7,7524 ^{NS}	0,0420 ^{NS}
Tensão matricial (Ψ)	3	435,6058**	0,1678 ^{NS}
Interação (M x Ψ)	6	157,1330 ^{NS}	0,2233*
Resíduo 1	72	76,4451	0,0790
DAS (D)	2	61729,4633**	27,1288**
Resíduo 2	18	29,0580	0,0570
Interação (D x M)	4	12,7261 ^{NS}	0,0681 ^{NS}
Interação (D x Ψ)	6	267,8292**	0,0765*
Interação (D x M x Ψ)	12	139,9829*	0,1342**
Resíduo 3	126	65,3250	0,0307
Média geral		26,62	3,85
CV 1 (%)		32,84	7,31
CV 2 (%)		20,25	6,21
CV 3 (%)		30,36	4,55

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** e *Significativo ao nível de 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Na Tabela 15 são mostradas as médias da altura da planta nas três datas de avaliação, para cada método de manejo, nas respectivas tensões. Os dados médios confirmam que os métodos de manejo não afetaram significativamente a altura do feijociro, até a floração (62 DAS), em nenhuma das tensões. Santos (2002), comparando dois métodos de manejo da irrigação (manual e automatizado) na cultura do pepino caipira, também verificou que o método de manejo não interferiu no crescimento das plantas, mostrando que o sistema de manejo automático pode ser utilizado sem restrições. O sistema automático utilizado por este autor é similar ao que foi utilizado no presente trabalho.

TABELA 15: Valores médios da altura da planta em função da tensão matricial, método de manejo da irrigação e idade da planta.

DAS	Método	Tensão matricial (kPa)			
		15	30	45	60
36 DAS	Hg	7,07	6,76	7,29	7,28
	Vc	7,47	7,29	7,14	7,32
	Ts	7,09	7,34	7,31	7,19
Médias		7,21	7,13	7,25	7,26
62 DAS	Hg	15,62	16,36	13,91	14,44
	Vc	14,67	17,96	13,25	15,69
	Ts	15,16	15,77	13,86	14,01
Médias		15,15	16,70	13,67	14,71
87 DAS	Hg	54,04	67,96	45,82	58,89
	Vc	49,75	70,07	51,18	58,61
	Ts	70,71	60,82	53,61	49,68
Médias		58,17	66,28	50,20	55,73

Na Figura 25 é mostrado o comportamento da altura da haste principal em função da idade e da tensão matricial em cada método de manejo. Observa-se um comportamento linear do crescimento do feijociro em função da idade da planta, em todas as tensões avaliadas. As equações de regressão obtidas revelam um coeficiente de determinação praticamente constante para todos os tratamentos.

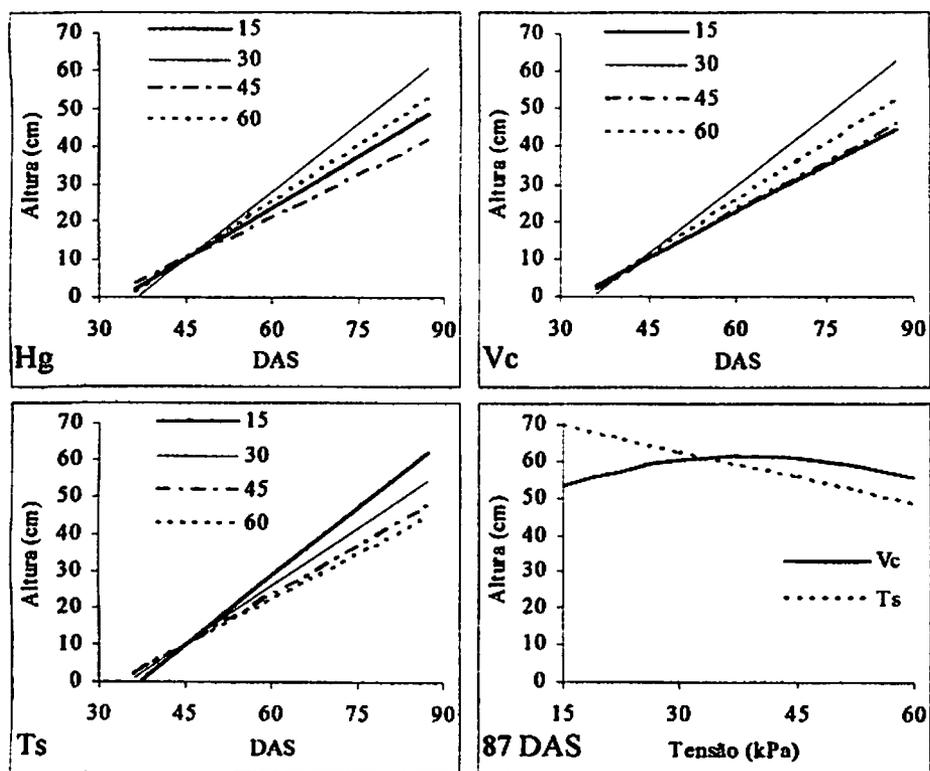


FIGURA 25: Estimativas da altura da planta do feijoeiro em função da idade e tensões de água no solo, em diferentes métodos de manejo.

A variação significativa do crescimento da haste principal, em função das tensões aplicadas, foi verificada apenas na última data de avaliação (87 DAS) para os métodos Vc e Ts. As diferentes tensões no método Hg não afetaram significativamente o crescimento da haste principal do feijoeiro. O modelo ajustado para o método Ts está de acordo com Stone et al. (1990b), que constataram redução no crescimento do feijoeiro com o aumento da tensão.

Ainda na Figura 25 verifica-se que, para o método Hg, o maior tamanho das plantas foi alcançado quando se irrigou o feijoeiro na tensão de 30 kPa e o

pior, na tensão de 45 kPa. Este resultado está de acordo com o volume aplicado, que foi maior para a tensão 30 kPa e menor para 45 kPa. Para as tensões de 15 e 60 kPa a variação do crescimento foi mínima, apesar de o volume de água ter sido bastante diferente.

Já o método Vc apresentou um ponto de máximo na tensão de 45 kPa, que está de acordo com os dados de volume aplicado. Neste caso, o volume aplicado no tratamento Vc-45 foi maior devido às falhas no acionamento. Todavia, a tendência natural seria a diminuição do volume de irrigação com o aumento da tensão, provocando aumento do déficit hídrico e diminuição do crescimento do feijoeiro, como demonstrado por Figuerêdo (1998).

Na Tabela 16 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para a altura da haste principal em função da Tensão e DAS para cada método.

TABELA 16: Coeficientes de ajuste dos modelos da altura da haste principal (H) em função da Tensão e DAS.

Métodos com as tensões	$H \text{ (cm)} = a \text{ (DAS)}^2 + b \text{ (DAS)} + c$			
	a	b	c	r ² (%)
Hg-15**	-	0,9170	-30,9754	87,39
Hg-30**	-	1,1945	-43,2992	85,65
Hg-45**	-	0,7521	-24,0445	86,68
Hg-60**	-	1,0071	-35,2327	84,37
Vc-15**	-	0,8253	-26,9345	86,58
Vc-30**	-	1,2255	-43,7941	86,55
Vc-45**	-	0,8594	-29,1402	84,36
Vc-60**	-	1,0011	-34,5281	86,10
Ts-15**	-	1,2414	-45,5639	83,52
Ts-30**	-	1,0438	-36,3865	85,70
Ts-45**	-	0,9033	-30,7793	84,55
Ts-60**	-	0,8293	-27,5130	85,91
Métodos na data 87 DAS	$H \text{ (cm)} = a \text{ (Y)}^2 + b \text{ (Y)} + c$			
	a	b	c	r ² (%)
Hg (87) ^{NS}	-	-	-	-
Vc (87)*	-0,0143	1,1256	39,6607	17,17
Ts (87)**	-	-0,4688	76,2857	96,52

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** e * Significativo ao nível de 1 e 5%, respectivamente

4.7.3 Diâmetro do caule

Na análise de variância da Tabela 14 verificou-se que esta característica foi afetada pela idade da planta (DAS) e pelas interações Métodos x Tensões e DAS x Métodos x Tensões.

Na Tabela 17 são mostrados os valores médios do diâmetro da haste principal nas três datas de avaliação, para cada método de manejo, nas respectivas tensões.

TABELA 17: Valores médios do diâmetro da haste principal em função da tensão matricial, método de manejo da irrigação e idade da planta.

DAS	Método	Tensão matricial (kPa)			
		15	30	45	60
36 DAS	Hg	3,20	3,28	3,26	3,29
	Vc	3,22	3,28	3,28	3,30
	Ts	3,20	3,21	3,20	3,29
Médias		3,21	3,26	3,25	3,29
62 DAS	Hg	4,02	4,00	3,80	3,95
	Vc	3,91	4,01	3,96	3,95
	Ts	3,85	3,87	3,73	3,85
Médias		3,93	3,96	3,83	3,92
87 DAS	Hg	4,49	4,63	4,12	4,28
	Vc	3,94	4,61	4,50	4,38
	Ts	4,67	4,37	4,29	4,31
Médias		4,37	4,54	4,30	4,32

Os dados médios do diâmetro do caule mostrados na Tabela 16 indicam que não houve influência do método de manejo no diâmetro da haste do feijoeiro até a floração em nenhuma das tensões. Este resultado está de acordo com o que

foi observado para a altura da haste principal, o que já era esperado, pois as duas características estão intimamente relacionadas.

Na Figura 26 é apresentado o comportamento do diâmetro da haste principal.

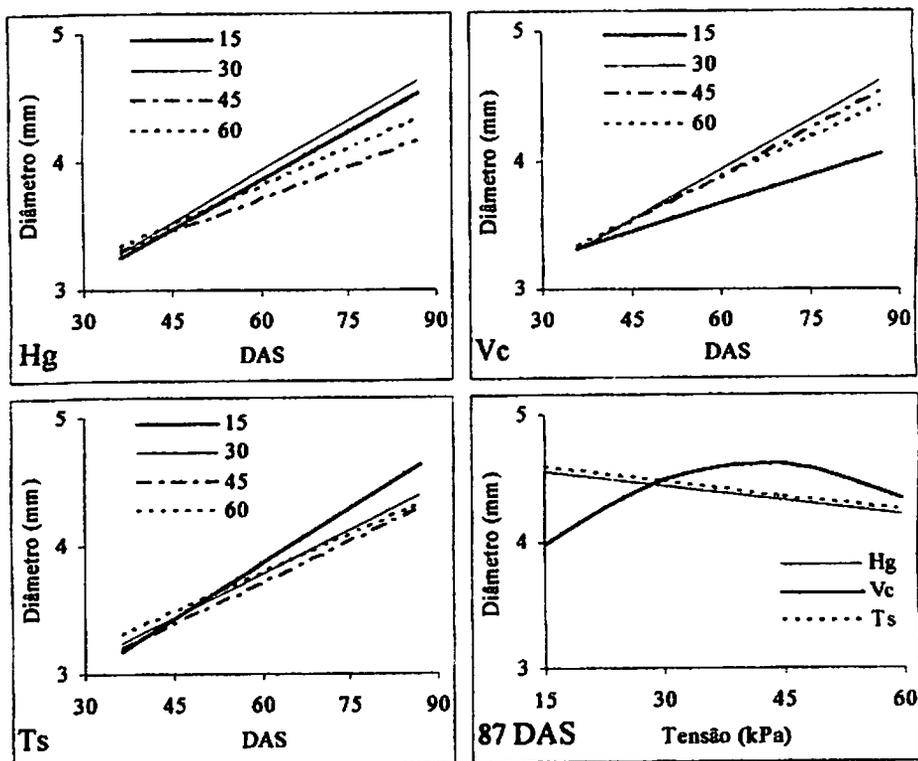


FIGURA 26: Estimativas do diâmetro da haste principal do feijoeiro em função da idade e tensões de água no solo, em diferentes métodos de manejo.

Observa-se, na Figura 26, que o diâmetro da haste principal apresentou uma tendência de crescimento linear, em função dos dias após semeadura, em todas as tensões avaliadas. Além da tendência linear, observa-se uma

semelhança no coeficiente de determinação, mostrando variação uniforme dos dados estimados pelos modelos ajustados.

No final do ciclo vegetativo (87 DAS) foi observado que o diâmetro decresceu linearmente com o aumento da tensão nas plantas submetidas aos métodos de manejo Hg e Ts. O método Vc apresentou um comportamento quadrático com ponto de máximo na tensão 45 kPa, o que pode ser devido ao menor estresse hídrico deste tratamento por causa das falhas que redundaram num maior volume de água aplicado.

Na Tabela 18 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para o diâmetro da haste principal em função da Tensão e DAS para cada método.

TABELA 18: Coeficientes de ajuste dos modelos do diâmetro da haste principal (Dh) em função da Tensão e DAS.

Métodos com as tensões	Dh (mm) = a (DAS) ² + b (DAS) + c			
	A	b	c	r ² (%)
Hg-15**	-	0,0250	2,2391	97,97
Hg-30**	-	0,0265	2,3321	99,92
Hg-45**	-	0,0169	2,6889	98,20
Hg-60**	-	0,0195	2,6329	96,89
Vc-15**	-	0,0142	2,8126	79,33
Vc-30**	-	0,0260	2,3614	99,78
Vc-45**	-	0,0240	2,4327	99,72
Vc-60**	-	0,0213	2,5671	98,80
Ts-15**	-	0,0289	2,1282	99,43
Ts-30**	-	0,0227	2,4218	99,51
Ts-45**	-	0,0214	2,4224	99,93
Ts-60**	-	0,0200	2,5843	99,87
Métodos na data 87 DAS	Dh (mm) = a (Y) ² + b (Y) + c			
	a	b	c	r ² (%)
Hg (87)*	-	-0,0075	4,6624	42,75
Vc (87)*	-0,0009	0,0732	3,0768	88,64
Ts (87)**	-	-0,0077	4,6986	70,63

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** e * Significativo ao nível de 1 e 5%, respectivamente

4.8 Características agronômicas do feijoeiro

Na Tabela 19 é apresentado um resumo das análises de variância dos dados relativos ao número de vagens por planta, ao número de grãos por planta, ao número de grãos por vagem e ao rendimento de grãos. Os métodos de manejo influenciaram significativamente o número de grãos por planta e o número de grãos por vagem. A tensão e sua interação com métodos de manejo somente não interferiram significativamente no número de grãos por vagem. À exceção do número de grãos por vagem, portanto, o efeito das tensões matriciais foi diferenciado nos diferentes métodos de manejo.

TABELA 19: Análise de variância dos dados relativos ao número de vagens por planta (NVg), número de grãos por planta (NGr), número de grãos por vagem (NGr/Vg), rendimento de grãos (R) e peso de 100 grãos (P100).

Fonte de variação	G.L.	Q. M				
		NVg	NGr	NGr/Vg	R	P100
Método de manejo (M)	2	0,019 ^{NS}	2,355*	0,155**	28,17 ^{NS}	33,34 ^{NS}
Tensão matricial (Ψ)	3	1,033**	4,822**	0,017 ^{NS}	55,46**	14,71 ^{NS}
Interação (M x Ψ)	6	0,731**	5,025**	0,039 ^{NS}	83,94**	22,54 ^{NS}
Resíduo	72	0,0705	0,5063	0,0309	9,7981	19,47
Média geral		14,75	51,97	3,55	14,99	29,06
CV (%)		6,95	9,97	9,37	20,88	15,19

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Os métodos de manejo, afetando significativamente o número de vagens por planta e a produtividade somente através de sua interação com as tensões, são compatíveis com o verificado na análise dos parâmetros de crescimento e

mostram claramente que o sistema automático, apesar da sua simplicidade, foi capaz de substituir a ação humana na determinação do momento de irrigar. Este resultado parece indicar que o controlador alternativo avaliado pode ser utilizado com segurança.

4.8.1 Número de vagens por planta

Na Tabela 20 são mostradas as médias do número de vagens por planta em função das tensões matriciais e dos métodos de manejo. Observa-se que o número de vagens por planta alcançado no método Vc foi inferior aos demais nas tensões de 15 e 30 kPa e superior na tensão de 45 kPa, mas não diferiu deles na maior tensão estudada (60 kPa).

TABELA 20: Valores médios do número de vagens do feijoeiro em função da tensão matricial e de métodos de manejo da irrigação.

Método	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	17,07 b	17,21 b	10,71 a	13,43 a
Vc	13,86 a	14,43 a	17,29 b	13,21 a
Ts	17,64 b	16,93ab	12,21 a	13,00 a
Médias	16,19	16,19	13,40	13,21

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 27 é mostrado o comportamento do número de vagens por planta em função das diferentes tensões, em cada método de manejo.

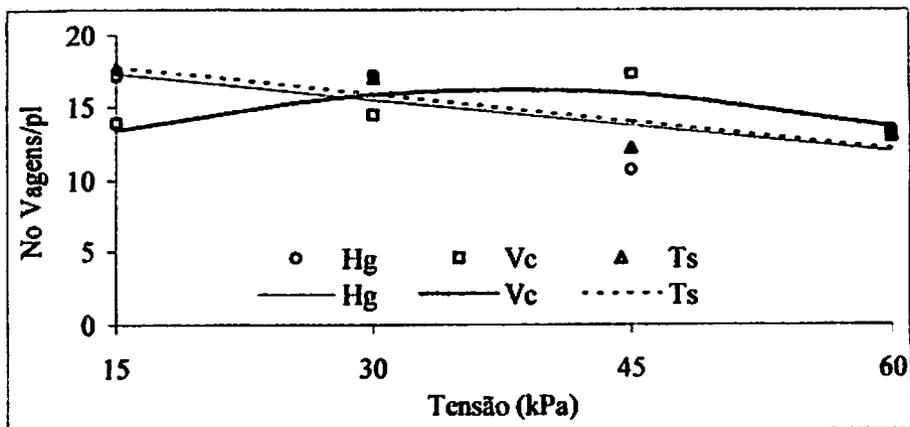


FIGURA 27: Número médio de vagens por planta em função das diferentes tensões matriciais, em cada método de manejo.

Observa-se que nos métodos Hg e Ts o número de vagens por planta decresceu linearmente com o incremento da tensão matricial, de forma bastante parecida nos dois métodos. Este resultado pode ser decorrente do volume de água aplicado, o qual seguiu a mesma tendência. Resultados semelhantes foram encontrados por Figuerêdo (1998), Stone et al. (1990a) e Pavani (1985), que verificaram decréscimo do número de vagens por planta com o aumento do déficit hídrico (Figura 27).

Na Tabela 21 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para o número de vagens por planta para cada método de manejo em função da tensão.

TABELA 21: Coeficientes de ajuste dos modelos do número de vagens por planta (Nvg) em função da tensão.

Métodos de manejo	Nvg = a (Y) ² + b (Y) + c			
	a	b	c	r ² (%)
Hg**	-	-0,1162	18,9643	51,64
Vc**	-0,0052	0,3931	8,6670	56,13
Ts**	-	-0,1243	19,6071	77,40

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

Quando se observa o coeficiente angular das equações de regressão verifica-se que a variação do número de vagens por planta em função da tensão foi ligeiramente maior para o método Ts, em comparação com o método Hg. Pode-se relacionar tal resultado à maior precisão do método Hg em comparação com o método Ts. Também na Figura 17 observa-se um menor turno de rega para o método Hg, contribuindo com a redução do estresse e permitindo uma reposta mais eficiente da planta em relação ao número de vagens por planta.

Macedo Júnior (1993) observou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade para a mesma variável quando cultivou o feijoeiro comum, em vaso, submetido a diferentes tensões. A maior média foi obtida no tratamento em que o feijoeiro foi submetido à tensão de 10 kPa, que no seu experimento correspondeu à tensão da capacidade de campo.

Ainda pela Figura 27, verifica-se que no método Vc os dados ajustaram-se melhor ao modelo quadrático. A menor média foi observada para a tensão de 15 kPa, que pode ser explicada pelo menor volume de água aplicado pelo controlador, em comparação com os demais métodos. A maior média foi observada para a tensão de 45 kPa, que foi o tratamento em que houve o maior número de falhas e também o maior volume aplicado, mostrando que para as condições do experimento, a maior disponibilidade hídrica favoreceu a formação e o crescimento de vagens.

4.8.2 Número de grãos por planta

Na Tabela 22 estão as médias do número de grãos por planta.

TABELA 22: Valores médios do número de grãos por planta em função da tensão matricial e de métodos de manejo da irrigação.

	15 kPa	30 kPa	45 kPa	60 kPa
Hg	63,43 b	60,36 a	33,71 a	54,07 a
Vc	49,29 a	55,64 a	68,00 b	48,00 a
Ts	58,64 ab	56,93 a	34,07 a	41,50 a
Médias	57,12	57,64	45,26	47,86

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observam-se diferenças entre as médias apenas nas tensões de 15 e 45 kPa. Na tensão 15 kPa, a menor média foi obtida no método Vc, que não diferiu estatisticamente do método Ts pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a tensão de 45 kPa a média do método Vc foi diferente dos demais e aproximadamente duas vezes maior.

Na Figura 28 são mostrados os modelos ajustados para o número de grãos por vagem em função das tensões para cada método de manejo. Observa-se que o comportamento do número de grãos por planta em função das tensões foi bastante parecido com o do número de vagens e que o número de grãos por planta decresceu linearmente com o aumento da tensão nos métodos Hg e Ts. No método Vc, esse comportamento foi quadrático e influenciado pelas médias observadas nas tensões de 15 e 45 kPa, as quais podem estar relacionadas com os volumes de água aplicados, com o número de acionamentos e com o número de falhas, conforme já foi discutido.

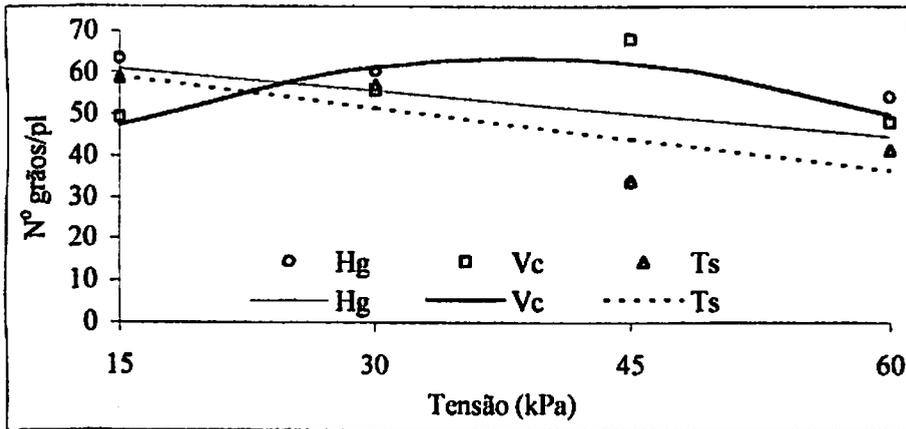


FIGURA 28: Número médio de grãos por planta em função das das diferentes tensões matriciais, em cada método de manejo.

Na Tabela 23 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para cada método em função da tensão matricial.

TABELA 23: Coeficientes de ajuste dos modelos do número de grãos por planta (Ngr) em função da tensão.

Métodos de manejo	Ngr = a (Ψ) ² + b (Ψ) + c			r ² (%)
	a	b	c	
Hg**		-0,3648	66,5714	27,93
Vc**	-0,0293	2,2531	20,1607	70,67
Ts**		-0,4952	66,3571	64,31

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

Os resultados do comportamento do número de grãos, próximo ao do número de vagens, mostram haver uma relação direta entre as duas características, o que é coerente.

4.8.3 Número de grãos por vagem

A fonte de variação tensão não influenciou o número de grãos por vagem, o que pode ser explicado pelo intervalo de tensão utilizado (15 a 60 kPa) e que compreende à faixa considerada ideal para o cultivo do feijoeiro (Silveira & Stone, 2001). Também deve ser considerado que este componente do rendimento do feijoeiro é tido como uma característica varietal menos influenciada pelas condições ambientais que os demais componentes, qual sejam o número de vagens por planta e o peso médio do grão (Teixeira, 1998).

Stone et al. (1990a), estudando o efeito da tensão de água no solo no cultivo do feijoeiro, observaram que o número de grãos por vagem decresceu à medida que as irrigações foram feitas com tensões crescentes. Os autores trabalharam com as tensões de 12,5; 25; 37,5; 50; 62,5 e 75 kPa. O efeito significativo pode ter sido devido ao maior intervalo de tensão utilizado pelos autores.

O número de grãos por vagem é o resultado matemático da divisão do número de grãos pelo número de vagens. No entanto, o resultado estatístico não é idêntico para as estas variáveis, mostrando que a disponibilidade de água no solo e o método de manejo afetaram as mesmas de forma diferenciada (Tabela 24).

TABELA 24: Valores médios do número de grãos por vagem do feijoeiro cv. BRS. Talismã em função do método de manejo da irrigação.

Método de irrigação	Média
Hg	3,61 ab
Vc	3,77 b
Ts	3,25 a
Médias	5,54

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O maior número de grãos por vagem foi de 3,77, em média, para o método Vc. Macedo Junior (1993), trabalhando com a cultivar Preto Sessenta Dias submetida à tensão de 10 kPa, encontrou um valor de 3,41 para a maior média do número de grãos por vagem. Como já foi discutido, entretanto, esta característica é bastante dependente do fator cultivar (Teixeira, 1998).

4.8.4 Rendimento de grãos

Na Tabela 25 são mostrados os valores médios do rendimento de grãos em função das tensões matriciais e dos métodos de manejo da irrigação.

TABELA 25: Valores médios do rendimento de grãos do feijoeiro cv. BRS Talismã em função do método de manejo da irrigação.

Método	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	16,58 a	17,42 a	9,17 a	16,25 b
Vc	14,27 a	16,29 a	19,74 b	13,90ab
Ts	17,24 a	16,29 a	10,77 a	11,93 a
Médias	16,03	16,67	13,23	14,03

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os métodos de manejo da irrigação não afetaram o rendimento de grãos nas tensões de 15 e 30 kPa. Observa-se que, para a tensão de 45 kPa, o método Vc foi bastante superior aos demais, indicando que o maior volume de água

aplicado por este método foi convertido em produção. Para a tensão de 60 kPa, o método Vc não diferiu significativamente do demais.

Na Figura 29 é mostrado o comportamento da produção de grãos em função da tensão. No método Ts, houve redução linear da produção de grãos com o aumento da tensão, mostrando que o déficit hídrico provocado pelo aumento da tensão afetou significativamente o rendimento do feijoeiro, o que está de acordo com a literatura. Stone et al. (1999a) obtiveram resultados semelhantes para o feijoeiro submetido a diferentes tensões de água no solo. Luchiari Júnior & Figueredo (1990) encontraram resultados parecidos para a faixa de tensão de 100 kPa.

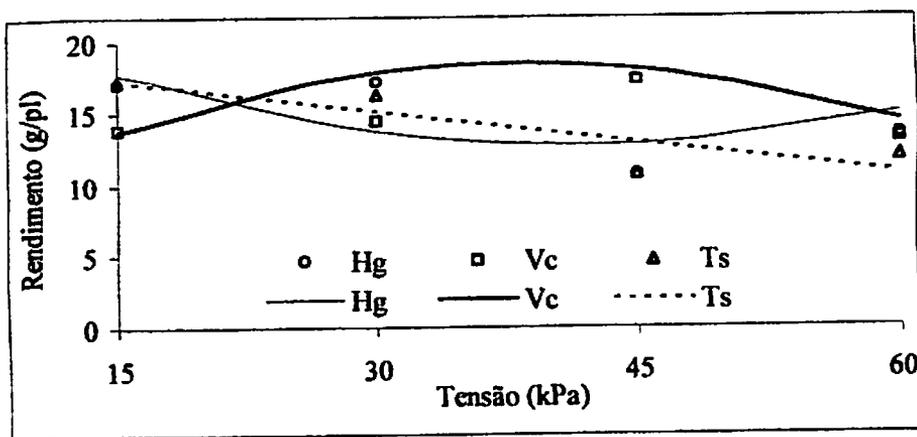


FIGURA 29: Rendimento de grãos obtidos por planta em cada método nos diferentes potenciais matriciais.

Na Tabela 26 são mostrados os coeficientes dos modelos ajustados para o número de grãos por planta em função das tensões.

TABELA 26: Coeficientes de ajuste dos modelos do rendimento de grãos por planta (Rgr) em função da tensão.

Métodos de manejo	Rgr (g) = a (Ψ) ² + b (Ψ) + c			
	a	b	c	r ² (%)
Hg**	0,0069	-05812	24,9604	31,94
Vc**	-0,0087	0,6708	5,6354	73,20
Ts**	-	-0,1430	19,4186	75,55

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

No método Vc o comportamento foi o mesmo observado para as demais variáveis, ou seja, os dados ajustaram-se melhor a um modelo quadrático com ponto de máximo rendimento alcançado com cerca de 38,55 kPa. Este resultado certamente foi influenciado pelo maior volume de água aplicado neste método na tensão 45 kPa. O método Hg apresentou comportamento quadrático inverso.

Verifica-se ainda, na Figura 29 e na Tabela 25, que a média obtida no tratamento Hg-45 foi menor que as demais, o que pode provavelmente estar associado com o menor número de acionamentos e o menor volume aplicado neste tratamento. A tendência normal observada é a que ocorreu para o método Ts, ou seja, uma diminuição da produção proporcional ao aumento da tensão. Resultado semelhante àquele obtido no método Ts foi encontrado por Stone et al. (1990a), que verificaram diminuição na produção à medida que se aumentou a tensão.

Tomando como referência o stand final recomendado para a cultivar Talismã (250.000 pl ha⁻¹), foi feita uma estimativa de produtividade para cada tratamento. A menor produtividade (2292 kg ha⁻¹) foi encontrada para o tratamento Hg-45 e a maior (4936 kg ha⁻¹), para o tratamento Vc-45. A explicação para a maior produtividade do tratamento Vc-45 pode ser a maior disponibilidade hídrica como resultado do mau funcionamento dos sensores (tensiômetros) deste tratamento. Este resultado reflete a imprecisão do

vacuômetro de Bourdon adaptado e confirma que a maior disponibilidade hídrica afeta positivamente a produtividade.

A menor produtividade para o tratamento Hg-45 kPa era esperada, pois foram verificados menores médias também para o número de vagens e o número de grãos. Este resultado pode ser devido a um fator inerente à própria cultivar e não ao tipo de manejo ao qual se submeteu a cultura.

4.8.5 Peso médio de 100 grãos

Pela análise de variância não houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F para o número de 100 grãos. Os resultados mostram que nem o método de manejo nem as diferentes tensões de água no solo afetaram o crescimento dos grãos. Figuerêdo (1998) também verificou que não há diferença estatística do peso de 100 grãos para o feijoeiro submetido às tensões de 30 e 60 kPa.

Na Tabela 27 são mostrados os dados médios obtidos para a variável peso médio de 100 grãos.

TABELA 27: Valores médios do peso de 100 grãos em função da tensão matricial em cada método de manejo da irrigação.

Métodos	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	25,91	28,54	27,46	30,00
Vc	28,76	29,29	29,09	29,01
Ts	29,50	28,70	33,64	28,30
Médias	28,06	28,84	30,06	29,10

Observa-se, na Tabela 27, que houve tendência de maior peso com o tratamento Ts-45. Este resultado é contrário ao observado para as outras variáveis, para as quais se constatou que o tratamento Ts-45, juntamente com o Hg-45, foram os piores.

Foi observado um valor médio de 29,06 g para o peso de 100 grãos. Este valor superou em 11,8% a média da cultivar Talismã que é de 26 g (Cultivar..., 2002).

O peso de 100 sementes é uma maneira indireta de se referir ao tamanho dos grãos. O valor encontrado mostra que no intervalo estudado, o tamanho dos grãos não foi afetado pelo volume de água aplicado como resultado da combinação de métodos de manejo com tensões matriciais.

4.9 Eficiência

Conforme a análise de variância mostrada na Tabela 28, verifica-se, para a variável eficiência de aplicação, que houve diferença significativa ao nível de 5% apenas para a Interação (M x Ψ).

TABELA 28: Resumo da análise de variância dos dados de Eficiência de Aplicação de Água (EA) e Eficiência de Uso da Água (EU).

Fonte de Variação	G.L.	Q. M.	
		EA	EU
Método de manejo (M)	2	0,002708 ^{NS}	0,048090 ^{NS}
Tensão matricial (Ψ)	3	0,015398 ^{NS}	0,065919 ^{NS}
Interação (M x Ψ)	6	0,016919*	0,144314**
Resíduo	72	0,007458	0,034911
Média geral		0,4035	0,8840
CV (%)		21,41	21,14

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

** e * Significativo ao nível de 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Os resultados da Tabela 28 mostram que as variáveis testadas não foram influenciadas pelos métodos de manejo. Este resultado indica a eficiência do controlador em realizar o manejo da irrigação automaticamente.

Quando se analisou o volume de água aplicado, verificou-se uma grande variabilidade, principalmente no método Vc; no entanto, toda água aplicada foi convertida em produção.

4.9.1 Eficiência de aplicação de água (EA)

Na Tabela 29 é mostrado o resultado do teste de médias dos dados de eficiência de aplicação de água.

TABELA 29: Valores médios da eficiência de aplicação em função da tensão matricial e do método de manejo.

Método	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	0,40	0,42	0,32	0,50
Vc	0,41	0,43	0,39	0,39
Ts	0,42	0,42	0,35	0,35
Médias	0,41	0,42	0,35	0,41

Verifica-se que para as tensões de 15, 30 e 45 kPa não houve diferença estatística entre os métodos. O teste de média para a tensão de 60 kPa mostrou que o método Vc se aproxima tanto do método Hg quanto do Ts. O melhor valor foi encontrado para o tratamento Hg-60, revelando uma maior eficiência, o que pode estar relacionado com a maior precisão deste método em relação aos demais.

O tratamento Vc-45 foi o que aplicou o maior volume de água devido às falhas detectadas no vacuômetro de Bourdon adaptado. No entanto, verifica-se que não houve diferença estatística entre os métodos, mesmo sendo a eficiência deste tratamento ligeiramente maior que a dos demais. Este resultado está de acordo também com as informações da Figura 29, que mostra um maior rendimento de grãos para o tratamento Vc-45.

O modelo ajustado foi significativo, ao nível de 5% de probabilidade, somente no método de manejo Hg, o qual é mostrado na Figura 30.

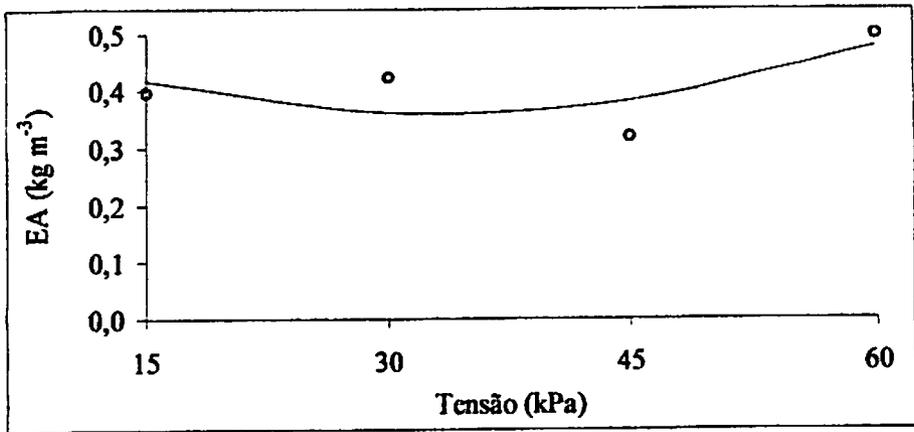


FIGURA 30: Eficiência de aplicação de água em função da tensão matricial para o método Hg.

Observa-se que o melhor ajuste, que passa pelos quatro pontos, foi o quadrático determinado pelo ponto de tensão 45 kPa.

Na Tabela 30 são mostrados os coeficientes do modelo ajustado para o método Hg.

TABELA 30: Coeficientes de ajuste dos modelos de eficiência de aplicação (EA) para cada método em função da tensão.

Métodos de manejo	EA (kg m ⁻³) = a (Ψ) ² + b (Ψ) + c			r ² (%)
	a	B	c	
Hg*	0,00017	-0,01123	0,54714	47,61
Vc ^{NS}	-	-	-	-
Ts ^{NS}	-	-	-	-

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

4.9.2 Eficiência de uso da água (EU)

A eficiência de utilização da água pelas culturas em relação ao rendimento obtido é um parâmetro de grande importância, sobretudo em locais onde a atividade de produção é diretamente determinada pela prática da irrigação, refletindo na rentabilidade e eficiência da produção (Doorenbos & Pruitt, 1984), além de ser um fator extremamente importante no planejamento da irrigação, principalmente em regiões áridas e semi-áridas nas quais a disponibilidade deste recurso é um fator limitante (Santos, 2002).

Na Tabela 24 são mostrados os dados médios da eficiência de uso da água pelo feijoeiro. Os valores médios obtidos ficaram entre $0,68 \text{ kg m}^{-3}$ (Hg-45) e $1,17 \text{ kg m}^{-3}$ (Hg-60), sendo a média geral de $0,88 \text{ kg m}^{-3}$. Doorenbos (1994) encontrou, para a cultura do feijoeiro, valor da eficiência de uso da água no caso da produção de grãos com umidade de 10%, da ordem de $0,3$ a $0,6 \text{ kg m}^{-3}$.

TABELA 31: Valores médios da eficiência de uso da água em função da tensão matricial e de métodos de manejo da irrigação.

Métodos	Tensão matricial (kPa)			
	15	30	45	60
Hg	0,85 a	0,90 a	0,68 a	1,17 b
Vc	0,86 a	1,00 a	0,94 b	0,86 a
Ts	0,90 a	0,89 a	0,81 ab	0,75 a
Médias	0,87	0,93	0,81	0,93

As médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A maior eficiência de uso da água foi obtida com a tensão de 60 kPa. Hegde & Srinivas (1989), trabalhando no intervalo de tensão entre 25 e 85 kPa,

encontraram melhor eficiência para o tratamento 45 kPa. Macedo Junior (1993), cultivando o feijoeiro em vaso, obteve maior eficiência na tensão de 500 kPa ($1,79 \text{ kg.m}^{-3}$) para a cultivar Preto 60 dias e 200 kPa ($1,73 \text{ kg.m}^{-3}$) para a cultivar Esal-688.

Para o feijoeiro cultivado a campo, Guandique (1993) e Saad (1991) encontraram valores de $0,95 \text{ kg.m}^{-3}$ e $0,80 \text{ kg.m}^{-3}$, respectivamente; valores que se aproximam da média geral obtida neste trabalho.

Na Figura 31 é mostrado o comportamento da eficiência de uso da água em função da tensão matricial. Verifica-se que a eficiência de uso da água foi semelhante à eficiência de aplicação, sendo influenciada também pelo tratamento Hg-45. Os modelos ajustados para os métodos Vc e Ts não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

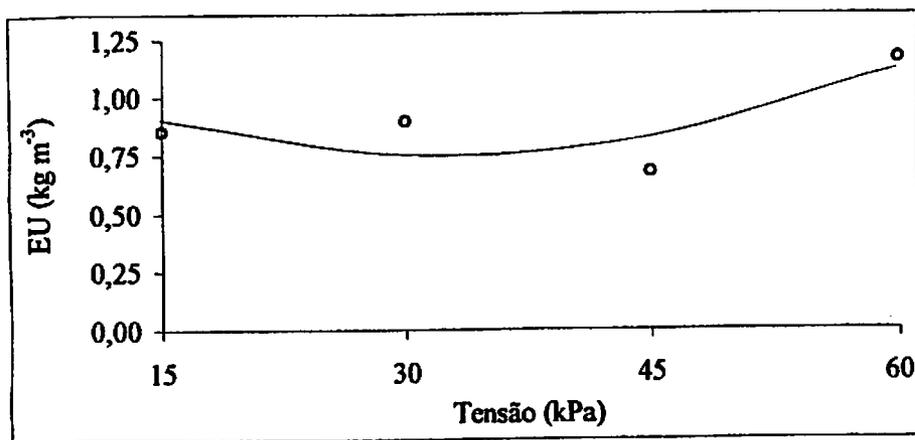


FIGURA 31: Eficiência de uso da água em função da tensão matricial para o método Hg.

Na Tabela 32 são mostrados os coeficientes do modelo ajustado para o método Hg.

TABELA 32: Coeficientes de ajuste dos modelos de eficiência de uso da água (EU) para cada método em função da tensão.

Métodos de manejo	EU (kg m ⁻³) = a (Ψ) ² + b (Ψ) + c			
	a	B	c	r ² (%)
Hg**	0,00049	-0,03236	1,27710	61,22
Vc ^{NS}	-	-	-	-
Ts ^{NS}	-	-	-	-

^{NS} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de F.

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

4.10 Comparação de custos

A Figura 32 mostra, comparativamente, o custo de cada tipo de tensiômetro utilizado neste trabalho. Verifica-se que o maior custo (R\$ 98,77) foi obtido para o tensiômetro que opera com vacuômetro de mercúrio (Hg). O tensiômetro convencional (Ts) para leitura com tensiômetro digital foi o mais barato (R\$ 55,27). O custo do tensiômetro de vacuômetro de Bourdon (Vc) foi intermediário (R\$ 73,24) em relação aos demais. Considerando apenas o custo, verifica-se que o tipo de tensiômetro mais indicado para o uso em sistemas automáticos é aquele que opera com vacuômetro de Bourdon.

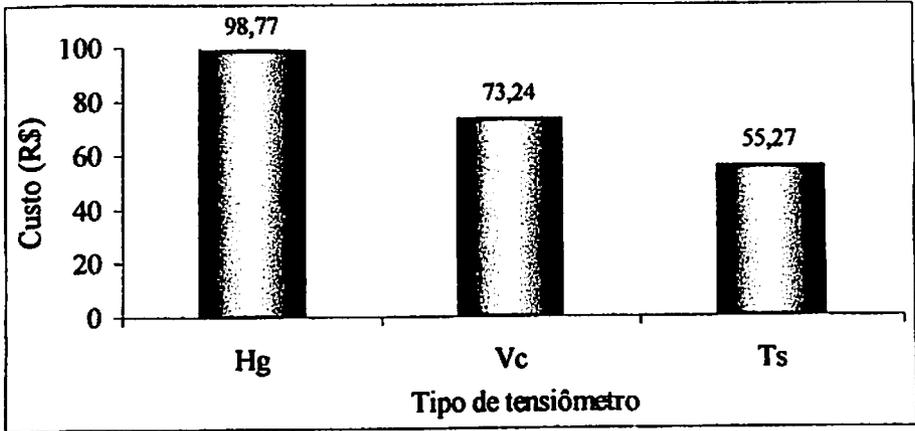


FIGURA 32: Comparação de custo dos três tipos de tensiômetros utilizados.

O tensiômetro de mercúrio, apesar de mais preciso, apresenta um custo mais elevado devido ao mercúrio utilizado para medir a tensão. Outro fator importante a ser considerado na escolha deste tipo de tensiômetro está relacionado à dificuldade de se encontrar mercúrio no mercado varejista devido à sua toxicidade. Associa-se ainda o risco de contaminação do usuário e do meio ambiente (Brasil et al., 2003).

O desempenho do tensiômetro de Bourdon neste trabalho foi inferior ao do tensiômetro de mercúrio devido às suas falhas. Modificações podem ser feitas a fim de melhorar o seu mecanismo de contato elétrico e de torná-lo um equipamento prático e acessível para utilização no manejo automático de sistemas de irrigação.

O custo do tensiômetro de Bourdon foi menor que o do tensiômetro de mercúrio. A utilização deste tipo de tensiômetro, além da grande vantagem do menor custo em relação do mercúrio, ainda elimina o risco de contaminação.

O menor custo (R\$ 55,27) foi o do tensiômetro convencional (Ts). O manejo feito com este equipamento apresentou resultados semelhantes aos que



foram conseguidos com o tensiômetro de mercúrio. No entanto, este tipo de tensiômetro não permite o manejo automático do sistema de irrigação.

O custo do tensímetro (R\$2750,00) é bem maior do que o custo do controlador alternativo (R\$84,03) que foi utilizado. Uma vantagem é que este equipamento, por ser portátil, permite a sua utilização em vários locais. No entanto, o tensiômetro convencional não pode ser utilizado como sensor de umidade em um sistema automatizado.

Apenas para efeito de comparação, relaciona-se a cotação atual da moeda americana (Dollar), que atualmente é negociada por R\$ 2,92.

5 CONCLUSÕES

- O controlador utilizado atendeu às expectativas, possibilitando o manejo da irrigação automaticamente, de acordo com a sensibilidade dos tensiômetros;
- Os resultados indicam que existe potencial de utilização de tensiômetros para o manejo automático da irrigação.
- Modificações devem ser feitas no sentido de melhorar o mecanismo sensor dos vacuômetros de Bourdon para evitarem as falhas, tornando-os equipamentos precisos e de possível utilização em sistemas de irrigação automatizados.
- Para a faixa de tensão compreendida entre 15 e 60 kPa, tanto o método de manejo padrão (Hg) quanto o manual (Ts) propiciaram aplicação de água de maneira uniforme, refletindo em rendimentos de grãos similares, o que demonstra que o sistema automatizado pode substituir o manual sem risco de queda na produção ou consumo excessivo de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRIANUAL 2004 – Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP Consultoria & Agrolnformativos, 2003.
- ANDRADE, M. J. B. Clima e solo. In: VIEIRA, C.; JUNIOR, T. J. P.; BORÉM, A. **Feijão: aspectos gerais e cultura no estado de Minas**. Viçosa: UFV, 1998. p. 83-97.
- ARAÚJO, D. F.; COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. S. Calibração de um sensor de temperatura aplicado a um tensiômetro eletrônico de leitura automática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM.
- AREAS, M. L.; LIMA, J. S. S.; MARTINS FILHO, S.; OLIVEIRA, R. B.; GARCIA, G. O. REIS, E. F. Avaliação do desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em diferentes profundidades de adubação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4. ed. Viçosa – MG: UFV. Imprensa Universitária, 1995. p. 657.
- * BOTREL, T. A.; SOUZA, R. O. R. M. Regulador de pressão automático controlado via computador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. CD-ROM.
- BRAGA, N. C. **Curso básico de eletrônica**. 3. ed. Editora saber, 1999. v. 2, 140 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normais Climatológicas: 1961-1990**. Brasília: EMBRAPA/DNMET, 1992. 84 p.
- BRASIL, R. P. C.; CASARINI, E.; FOLEGATTI, M. V.; VASQUEZ, M. A. N. Avaliação de vacuômetros de bourdon utilizados em tensiômetros no manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM.
- * CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia**. (RLAF). Local: Ediciones Mundi-Prensa, 1987. 459 p.

CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C. Novo tensiômetro - Rápido, contínuo e opera em tensões superiores a 100 kPa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2003, Goiânia-GO. *Anais...* Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM.

CARVALHO, L. G. de; SAMPAIO, S. C.; SILVA, M. A. da. Determinação da umidade na capacidade de campo "In situ" de um Latossolo Roxo Distrófico. *Engenharia Rural*, Piracicaba - SP, v. 7, 1-97, dez. 1996.

CHIEPPE JR., J. B.; KLAR, A. E.; STONE, L. F.; PEREIRA, A. L. Efeito do manejo da irrigação sob diferentes métodos de controle e tensões de água do solo na cultura do feijociro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. *Anais...* Goiânia-GO: SBEA, 2003. CD-ROM.

CULTIVAR de feijão Talismã. Sete Lagoas: UFLA/UFV/EMBRAPA/EPAMIG, 2002. Folder.

DICKSON, M. H.; PETZOLDT, R. Inheritance of low temperature tolerance in beans at several growth stages. *HortScience*, Madison, v. 22, n. 3, p. 481-483, 1987.

DOORENBOS, J. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução de H. R. Gheyi. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. 1994. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem; n.33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome, FAO, 1984. 144 p. (FAO: Irrigation and Drainage; n. 24).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro nacional de pesquisa agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. p. 412.

FARIA, R. T. de; COSTA, C. S. da. *Tensiômetro: construção, instalação e utilização; um aparelho simples para se determinar quando irrigar*. Londrina: IAPAR, 1987. p. 24. (IAPAR. Circular Técnica, 56).

FERNANDEZ, F.; GEPTS, P.; LÓPEZ, M. *Etapas de desarrollo em la planta de frijol*. In: LÓPEZ, M.; FERNANDEZ, F.; SCHOOWHOVEN, A. *Frijol, investigacion y produccion*. Colombia: CIAT, 1985. p. 61-80.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4. 0 In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos: Sociedade Internacional de Biometria, 2000. p. 255-258.

FIGUERÉDO, S. F. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro. 1998. 94 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

GUANDIQUE, M. E. G. Balanço hídrico no solo e consumo de água pela cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. 1993. 94 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

GENUCHTEN, M. T. H. van A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity fo unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 4, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

GERVÁSIO, E. S.; VILELA, L. A. A.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A.; AMARAL, J. R. Controlador de irrigação via PC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. CD-ROM.

GOMIDE, R. L. Monitoramento automático de fluxo de seiva com sondas de balanço de energia e caracterização de estresse hídrico de duas linhagens de milho (*Zea mays* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador-BA. *Anais...* Salvador: SBEA, 2002. CD-ROM.

X **GOMIDE, R. L.** Monitoramento para manejo da irrigação: Instrumentação, Automação e Métodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas-MG. *Anais...* Poços de Caldas: SBEA, 1998.

GONDIM, R. S.; AGRIAR, J. V. de; COSTA, R. N. T. Avaliação econômica de três métodos utilizados no cálculo da lâmina de água em irrigação de caupi para consumo em estado verde. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas-MG. *Anais...* Poços de Caldas: SBEA, 1998. p. 37-39.

GUERRA, A. F. Efeito da subirrigação em condições de casa de vegetação sobre as características agrônômicas do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). 1981. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HAYASHI, M.; KANP, G. van der; RUDOLPH, D. L. Use of tensiometer response time to determine the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science*, Baltimore, v. 162, n. 8, p. 566-575, Aug. 1997.

HEGDE, D. M.; SRINIVAS K. Effect of irrigation and nitrogen on growth, yield and water use of frenchbean. *Indian Journal Agronomy*, New Delhi, v. 34, n. 2, p. 180-184, June 1989.

HUBBELL, J.; SISSON, J. B. M. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. *Soil Science*, Baltimore, v. 163, n. 4, p. 271-277, Apr. 1998.

JUNQUEIRA, A. M. R.; OLIVEIRA, C. A. das.; VALADÃO, L. T. Fabricação "caseira" de tensiômetros de boa performance e baixo custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas-MG. *Anais.. Poços de Caldas: SBEA, 1998.*

KLEIN, V. A. Sistema automático de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu-PR. *Anais... Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. CD-ROM.*

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 1999. 497 p.

LUCHIARI JUNIOR, A.; FIGUEREDO, F. Estabelecimento do momento de irrigação em feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em latossolo de cerrados. In: REUNIÃO SOBRE FEIJÃO IRRIGADO (GO, DF, MG, SP, RJ), 1., 1988, Goiânia. EMBRAPA-CNPAP, 1990. p. 118-119.

MACEDO JUNIOR, E. K. Comportamento biofísico e agrônômico de plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) submetidos a cinco níveis de tensão matricial da água no solo. 1993. 103 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

MACHADO, P. B. Efeito de diferentes lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) 1988. 43 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 215 p..

*MEDICE, L. O. Acionador automático de sistemas de irrigação. **Revista da propriedade industrial**, Rio de Janeiro, n. 1399, 1997.

NAGOAKA, M. P. T.; MARTINS, C. M.; ESPERANCINI, M. T. S.; LEMOS, L. B. Avaliação econômica da cobrança da água para feijão irrigado por aspersão no município de Paranapanema - Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. CD-ROM.

NUNES, G. H. S. de. **Seleção de famílias de feijoeiro adaptadas às condições de inverno no sul de Minas Gerais**. 1997. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

NYHAN, W. J.; DRENNON, B. J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Science**, Baltimore, v. 54, p. 293-296, Jan \ Feb. 1990.

PAVANI, L. C. **Evapotranspiração e produtividade em feijoeiro comum (Phaseolus vulgaris L. cv. Goiano Precoce) sob três níveis de potencial da água no solo**. 1985. 171 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

PELOSO, M. J. del. Seleção de cultivares de feijão adaptadas ao cultivo de inverno no estado de Goiás. In: REUNIÃO SOBRE FEIJÃO IRRIGADO (GO, DF, MG, SP, RJ), 1., 1988, Goiânia. **Anais...** Goiânia: EMBRAPA/CNPAF, 1990. p. 89-92.

*QUEIROZ, T. M. de; GIACOMIN, J. C.; RABELO, G. F.; BRAGA JUNIOR, R. A. Circuito eletrônico para controle automático, em malha fechada, de sistemas de irrigação através de tensiômetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. CD-ROM.

QUEIROZ, T. M. de; SANTANTA, M. J. de; CARVALHO, J. A. de; LEDO, C. A. da S. Produção da alface americana irrigada sob diferentes tensões de água no solo. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFLA – CICESAL,

13., 2000, Lavras. **Livros de resumos....** Lavras: UFLA/FAEPE, 2000. p. 229.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 2, p. 211-216, maio/ago. 1988.

REIS, E. F.; POSSE, R. P.; BARROS, F. M.; PIEZOPANE, J. E. M.; CAMPANHARO, M. Avaliação de déficits hídricos e adubações para o desenvolvimento da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. CD-ROM.

REZENDE, R.; GONÇALVES, A. C. A.; FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; BERTONHA, A. Uniformidade de aplicação de água e variáveis de produção e de desenvolvimento da cultura de feijão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. CD-ROM.

RUBIN, R. B.; CARLESSO, F. D. DE BONA; MAGGI, M. F.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água no solo às plantas de feijão irrigado e cultivado nos sistemas plantio direto e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. CD-ROM.

SAAD, A. M. **Uso do tensiômetro no controle da irrigação por pivô central em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.).** 1991. 144 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SAAD, A. M.; LIBARDI, P. L. Aferição do controle da irrigação feito pelos agricultores utilizando tensiômetros de faixas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES IRRIGANTES, 5., 1994, Guairá, SP. p. 14.

SAAD, A. M.; LIBARDI, P. L. Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES IRRIGANTES, 4., 2002, GUAÍRA, SP. p. 27 IPT, 1992.

SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; QUEIROZ, T. M.; FAQUIN, V. Qualidade da produção do pimentão (*Capsicum annuum* L.) irrigado sob diferentes tensões de água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. CD-ROM.

SANTOS, D. S. dos. Efeitos da tensão de água no solo, na cultura do pepino (Cucumis sativus L.), utilizando sistema de irrigação automatizado. 2002. 60 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG

SCULLY, B.; WAINES, J. G. Germination and emergence response fo common and tepary beans to controlled temperature. *Agronomy Journal*, Madison, v. 79, n. 2, p. 287-91, Mar./Apr. 1987.

* SHOCK, C. C. Instrumentos para determinação da umidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas-MG. Anais... Poços de Caldas: SBEA, 1998.

SILVA, T. J. A.; CARMELLO, C. M.; BONFIM, E. M. S.; COELHO, R. D. Manejo da irrigação com lisímetro poroso e tensiometria na produção de melão rendilhado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia-GO. Anais... Goiania: SBEA, 2003. CD-ROM.

SILVA, W. A. da; MEDICI, L. O.; CARVALHO, D. F. de; CEDDA, M. B.; PEREIRA, M. G. Avaliação de um sistema automático de baixo custo para manejo da irrigação. *Revista Engenharia Rural*, Piracicaba, v. 12, p. 29-33, 2001.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. *Irrigação do feijoeiro*. Santo Antônio de Goiás-GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2001. p. 230.

X SKLLING, D. L.; BELOVE, C. *Circuitos eletrônicos discretos e integrados*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1979.

STANLEY, C. D.; MAYNARD, D. N. Vegetables. In: STEWART, D. R.; NIELSEN, D. R. (Ed.) *Irrigation of agricultural crops*. Madson: ASA \ CAAA \ SSSA, 1990. p. 921-950.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, C. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e o crescimento do feijoeiro. I. Produtividade. In: REUNIÃO SOBRE FEIJÃO IRRIGADO (GO, DF, MG, SP, RJ), 1., 1988, Goiânia. EMBRAPA-CNPAP, 1990a. p. 111.

STONE, L. F.; TOMÁS, A. P.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e o crescimento do feijoeiro. II. Crescimento. In: REUNIÃO SOBRE FEIJÃO IRRIGADO (GO, DF, MG, SP, RJ), 1., 1988, Goiânia. EMBRAPA-CNPAP, 1990b. p. 111.

TEIXEIRA, I. R. Comportamento de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Pérola) submetido a diferentes densidades de semeadura e níveis de adubação nitrogenada. 1998. 68 p. Dissertação (mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ULLOA, A. M. C. Efeitos de épocas de deficiência hídrica na produtividade e na eficiência do uso da água e nitrogênio na cultura do feijão cv. Imbabelo. 1997. 131 p. Dissertação (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP.

VALADÃO, L. T.; KLAR, A. E. Evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em dois níveis do lençol freático. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., 1996, Campinas-SP. Anais.... Campinas, 1996.

VILAGRA, M. DE las M. Variabilidade de medidas de tensiômetro em terra roxa estruturada. 1988. 64 p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP.

VON PINHO, R. G. Tolerância do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) a baixas temperaturas na fase de germinação e emergência. 1990. 86 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ANEXOS

ANEXO A	Página
TABELA 1A Composição de custo do controlador alternativo construído para o controle da irrigação do experimento.....	110
TABELA 2A Composição de custo da fonte construída para alimentação do controlador.....	111
TABELA 3A Composição de custo para construção de um tensiômetro com vacuômetro de mercúrio (Hg).....	111
TABELA 4A Composição de custo para construção de um tensiômetro com vacuômetro Bourdon (Vc).....	112
TABELA 5A Composição de custo para construção de um tensiômetro convencional para tensiômetro digital (Ts).....	112
TABELA 6A Caracterização química do solo contido nos vasos com as plantas aos 43 DAS.....	112

TABELA 1A: Composição de custo do controlador alternativo construído para o controle da irrigação do experimento.

Descrição do material utilizado	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Resistor de 10 k Ω - 1/8W	12	Un	0,05	0,60
Resistor de 0,33 k Ω - 1/8W	4	Un	0,05	0,20
Transistor BC 548	4	Un	0,25	1,00
Transistor BD 135	4	Un	0,50	2,00
Diodo 1N 4007	4	Un	0,10	0,40
Capacitor 100 μ F - 16V	1	Un	0,35	0,35
LED 3 mm	4	Un	0,12	0,48
Relê 5Vcc	8	Un	3,60	28,80
Soquetes torneados 14 pinos	7	Un	0,50	3,5
*CI 74 LS 04	2	Un	0,60	1,20
CI 74 LS 08	3	Un	0,60	1,80
CI 74 LS 32	2	Un	0,60	1,20
**PCI 10x15 cm ²	1	Un	15,00	15,00
Fio de solda	5	m	0,50	2,50
Mão-de-obra	-	-	25,00	25,00
			Custo final (R\$)	84,03

* e ** Circuito Integrado e Placa de Circuito Impresso, respectivamente.

TABELA 2A: Composição de custo da fonte regulada construída para alimentação do controlador.

Descrição do material utilizado	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Diodo 1N 4007	4	Un	0,10	0,40
Resistor de 1 k Ω - 1/8W	1	Un	0,05	0,05
Capacitor eletrolítico 1000 μ F - 16V	1	Un	0,50	0,50
Capacitor eletrolítico 100 μ F - 16V	1	Un	0,35	0,35
Capacitor cerâmico 0,22 μ F	1	Un	0,18	0,18
Capacitor cerâmico 0,10 μ F	1	Un	0,15	0,15
CI 7805	1	Un	1,50	1,50
PCI 5x5 cm ²	1	Un	5,00	5,00
Chave liga/desliga	1	Un	1,50	1,50
Fusível 1 ^a	1	Un	0,10	0,10
Soquete para fusível	1	Un	0,50	0,50
Solda	1	m	0,50	0,50
Mão-de-obra			4,50	4,50
			Custo final (R\$)	26,06

TABELA 3A: Composição de custo para construção de um tensiômetro com vacuômetro de mercúrio (Hg).

Descrição do material utilizado	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Tubo de PVC ½"	0,25	m	1,08	0,27
Cápsula porcelana - Vera Cruz	1	Un	45,00	45,00
Mercúrio líquido	10	mL	4,70	47,00
Microtubo PVC - Bagueete	2	m	0,75	1,50
Sarrafo de madeira	1,3	m	1,50	2,00
Cuba para mercúrio - vidro	1	Un	0,50	0,50
Contato elétrico	1	Un	0,00	0,00
Tampa	1	Un	0,00	0,00
Cola			0,50	0,50
			Custo final (R\$)	98,77

TABELA 4A: Composição de custo para construção de um tensiômetro com vacuômetro de Bourdon (Vc).

Descrição do material utilizado	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Tubo de PVC ½"	0,25	m	1,08	0,27
Tê de PVC ½"	1	Un	0,64	0,64
Cápsula porcelana – Vera Cruz	1	Un	45,00	45,00
Bucha de redução ½" / ¼" – Latão	1	Un	3,50	3,50
Vacuômetro Salvi Casagrande	1	Un	18,00	18,00
Cola			0,50	0,50
Fita veda rosca			0,25	0,25
Tampa	1	Un	0,00	0,00
Contato elétrico – pistas + escovas	1	Un	0,00	0,00
Mão-de-obra			5,00	5,00
Custo final (R\$)				73,24

TABELA 5A: Composição de custo para construção de um tensiômetro convencional para tensiômetro digital (Ts).

Descrição do material utilizado	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Tubo de PVC ½"	0,25	m	1,08	0,27
Cápsula porcelana – Vera Cruz	1	Un	45,00	45,00
Tubo de acrílico 12/8 mm	1	Un	3,50	3,50
Rolha de borracha	1	Un	4,00	4,00
Cola			0,50	0,50
Mão-de-obra			2,00	2,00
Custo final (R\$)				55,27

TABELA 6A: Caracterização química do solo contido nos vasos com as plantas aos 43 DAS.

pH		P		K		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ²⁺	H+Al			
(H ₂ O)		mg.dm ⁻³		%				cmol _c .dm ⁻³				
6,7		0,6		14		3,0	0,2	0,0	1,7			
SB	(t)	(T)	V	m	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
cmol _c .dm ⁻³		%		mg.L ⁻¹		mg.dm ⁻³						
3,2		3,2	4,9	65,6	0	3,9	1,4	37,2	19,4	5,3	0,4	56

Fonte: Laboratório de Fertilidade do Solo – DCS/UFLA.

ANEXO B	Página
FIGURA 1B	Fotos ilustrativas dos três modelos de Tensiômetros utilizados no Experimento.....114
FIGURA 2B	Fotos ilustrativas das mangueiras de irrigação, dos recipientes de controle e dos drenos experimento.....114
FIGURA 3B	Foto ilustrativa do quadro de comando do circuito eletro-eletrônico no manejo da irrigação.....115
FIGURA 4B	Foto ilustrativa do controlador utilizado no manejo automático da irrigação.....115
FIGURA 5B	Variação da umidade em função da tensão matricial, durante o período experimental, para as quatro tensões no método Ts.....116
FIGURA 6B	Volume de água aplicado (V_{apl}) durante o experimento para as quatro tensões nos três métodos de manejo.....117
FIGURA 7B	Projeto do circuito eletrônico do controlador utilizado para o manejo automático do sistema de irrigação.....118
FIGURA 8B	Projeto da placa de circuito impresso (dupla face) para construção do controlador de irrigação.....119
FIGURA 9B	Projeto da placa de circuito impresso para construção da fonte de Alimentação do controlador.....119
FIGURA 10B	Diagrama de ligação dos vacuômetros de mercúrio (Hg) e Bourdon (Vc) ao circuito eletrônico.....120
FIGURA 11B	Ilustração do funcionamento dos tensiômetros de mercúrio e estimativa da tensão média.....120

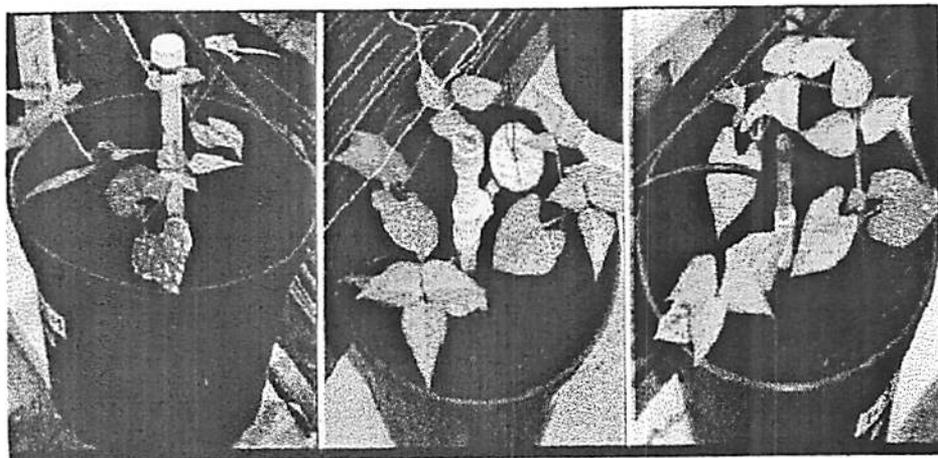


FIGURA 1B: Foto ilustrativa dos três modelos de tensiômetros utilizados no experimento.

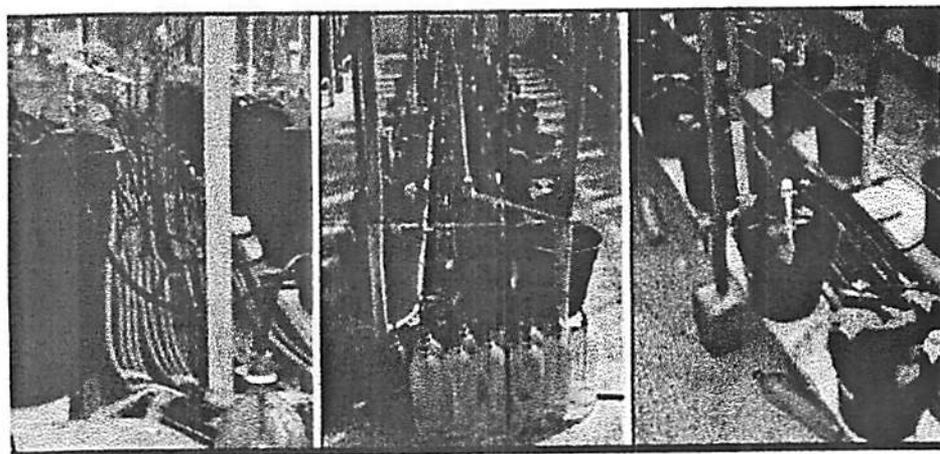


FIGURA 2B: Foto ilustrativa das mangueiras de irrigação, dos recipientes de controle e dos drenos.

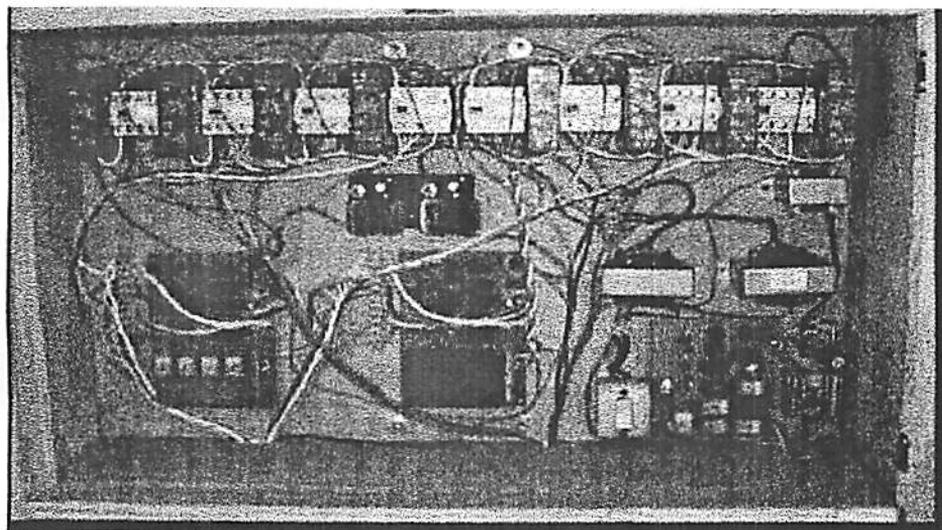


FIGURA 3B: Foto ilustrativa do quadro de comando do circuito eletro-eletrônico.

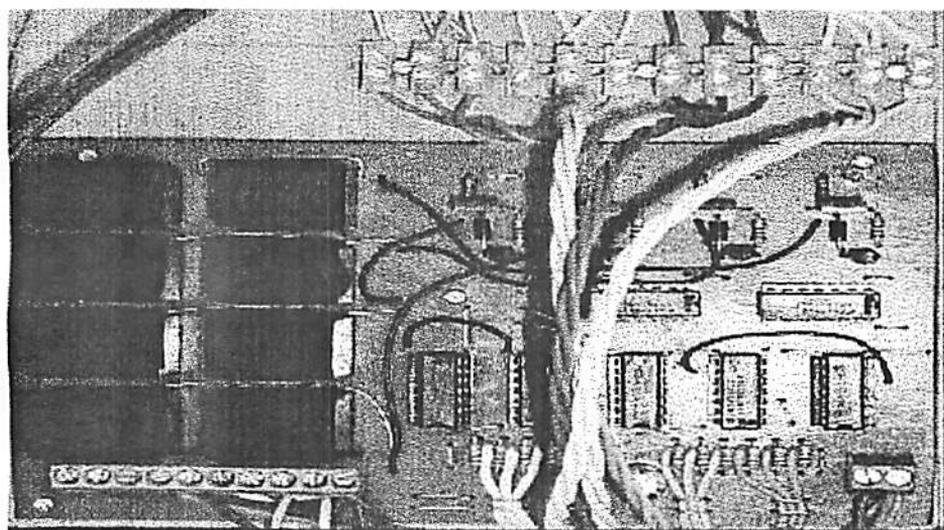


FIGURA 4B: Foto do controlador utilizado no manejo automático da irrigação.

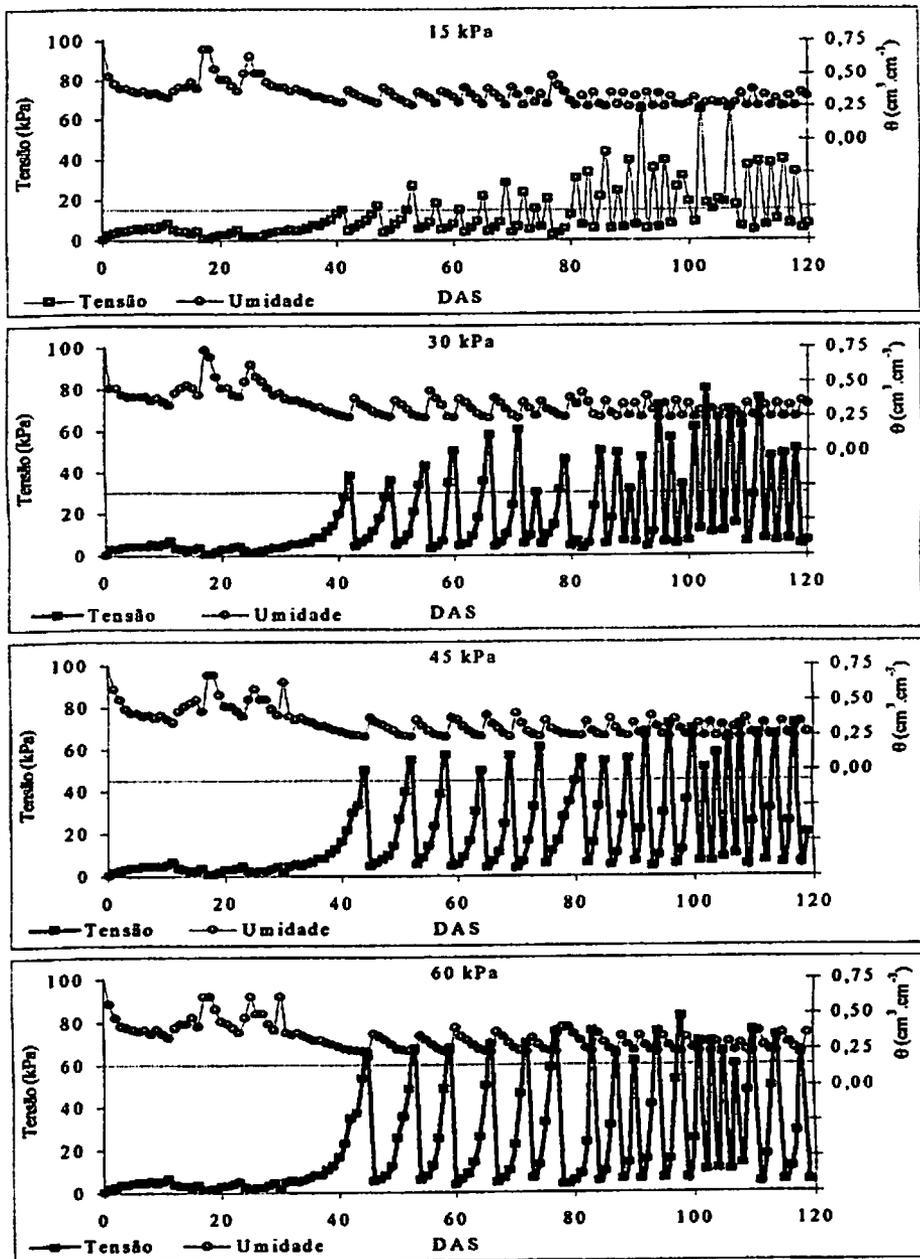


FIGURA 5B: Variação da umidade em função da tensão, durante o período experimental, para as quatro tensões no método Ts.

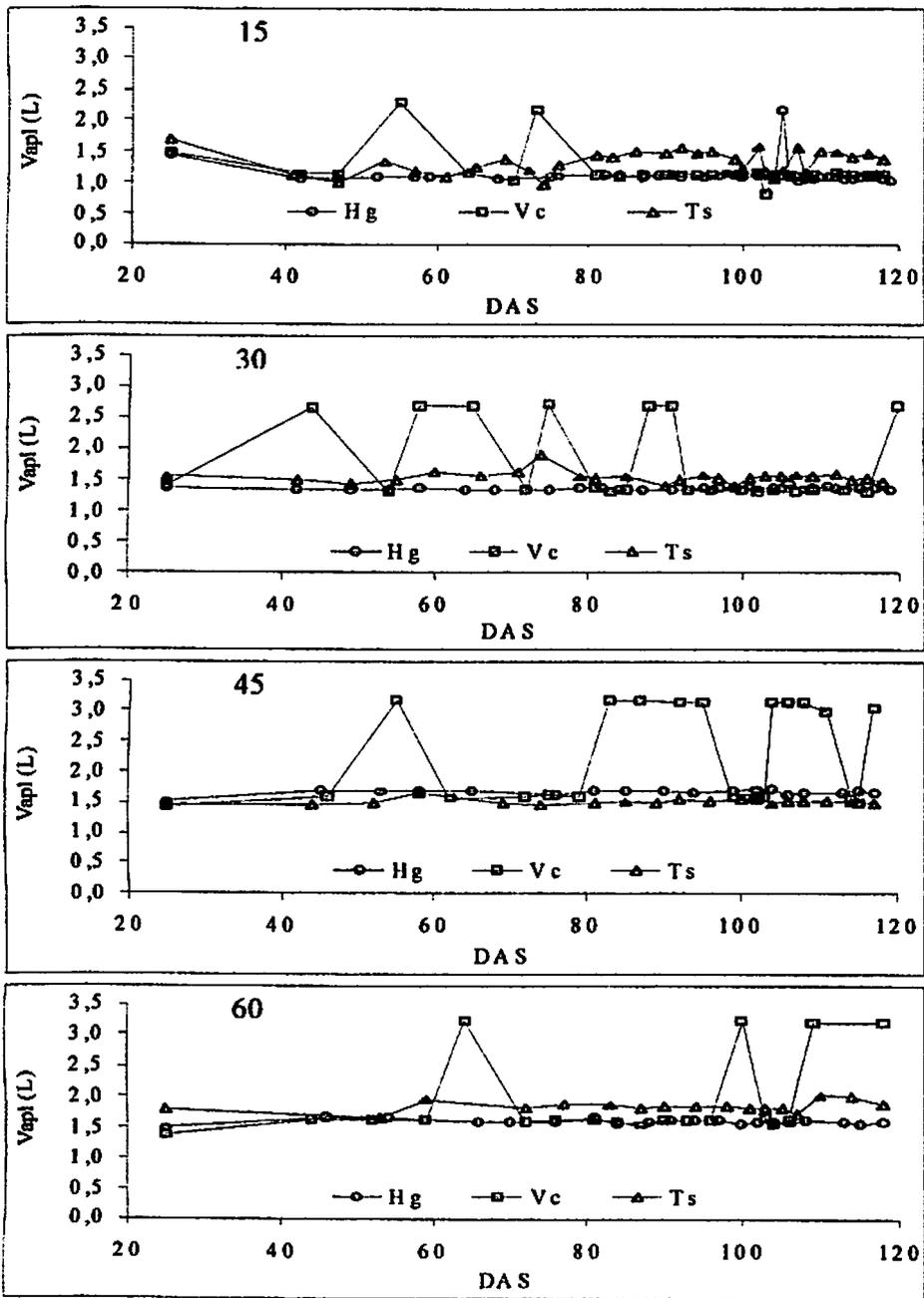


FIGURA 6B: Volume de água aplicado durante o experimento (Vapl) para a tensão de 15 kPa nos três métodos.

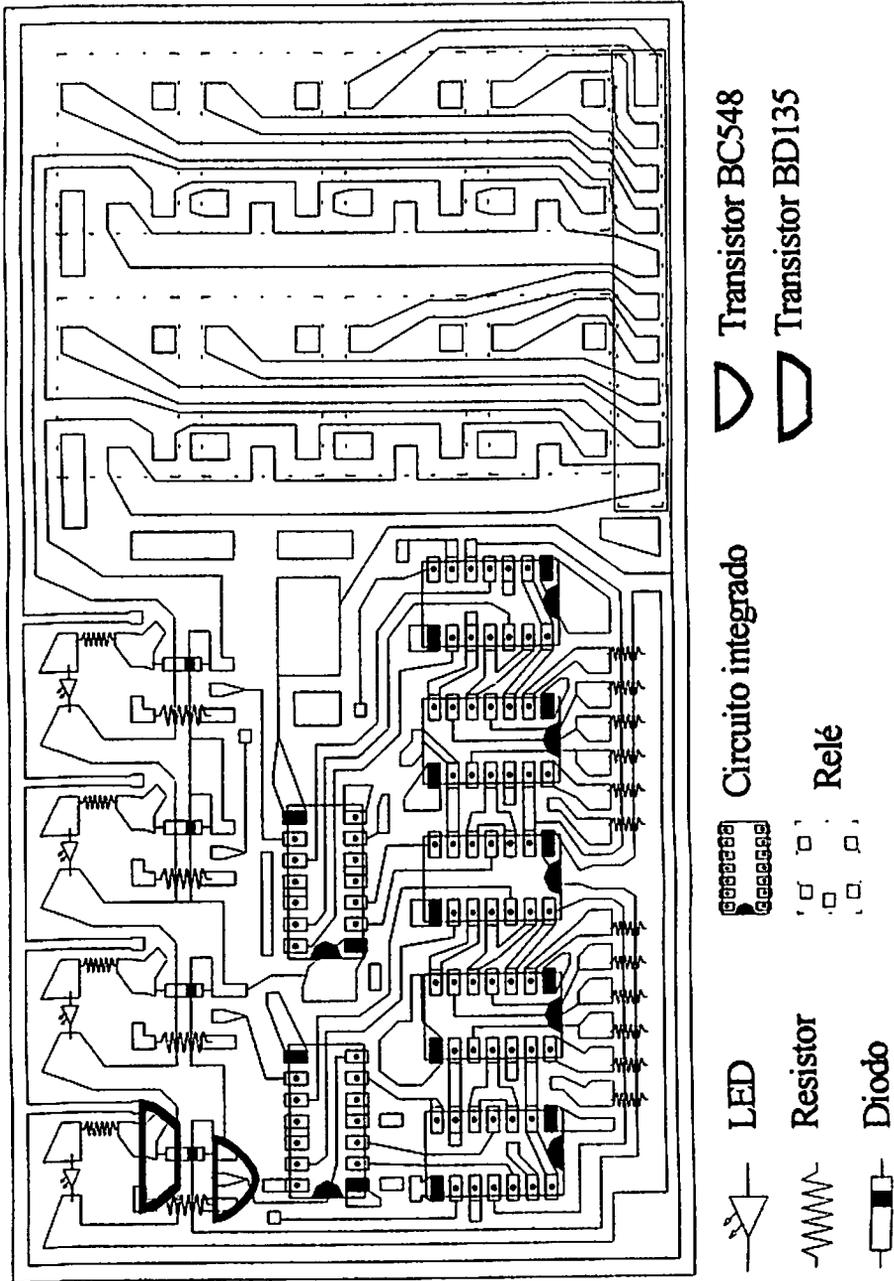


FIGURA 7B: Projeto do circuito eletrônico do controlador utilizado para fazer o manejo automático do sistema de irrigação.

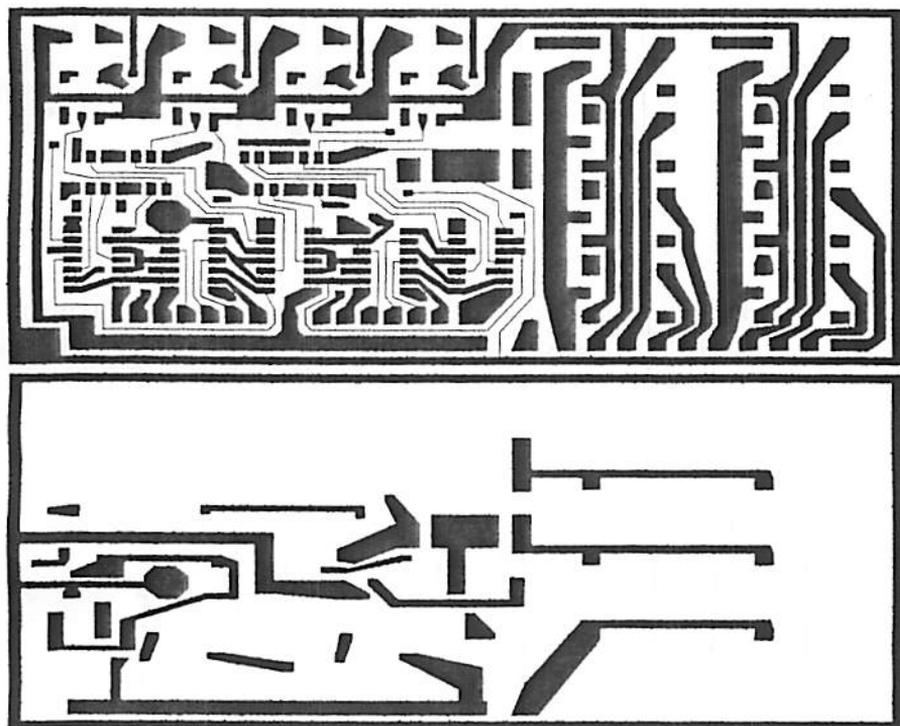


FIGURA 8B: Projeto da placa de circuito impresso (dupla face) para construção do controlador de irrigação.

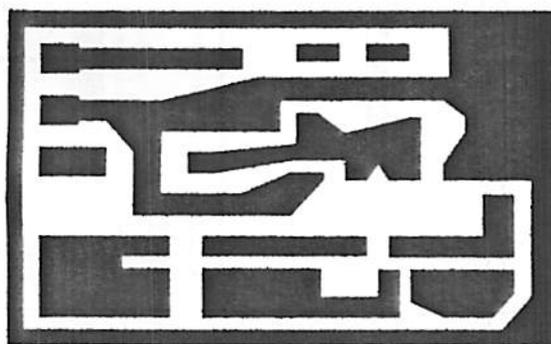


FIGURA 9B: Projeto da placa de circuito impresso para construção da fonte de alimentação.

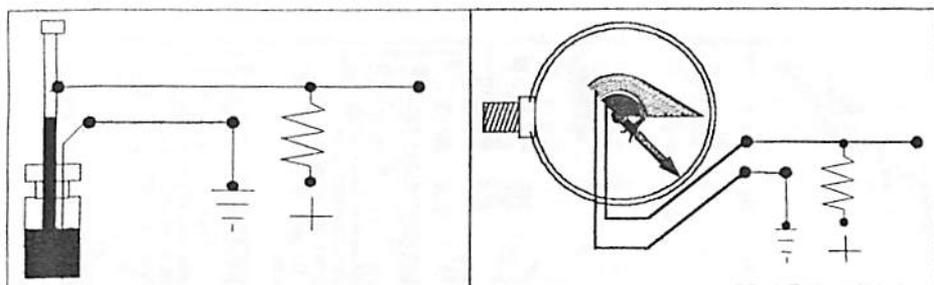


FIGURA 10 B: Diagrama de ligação dos vacuômetros de mercúrio (Hg) e Bourdon (vc) ao circuito eletrônico.

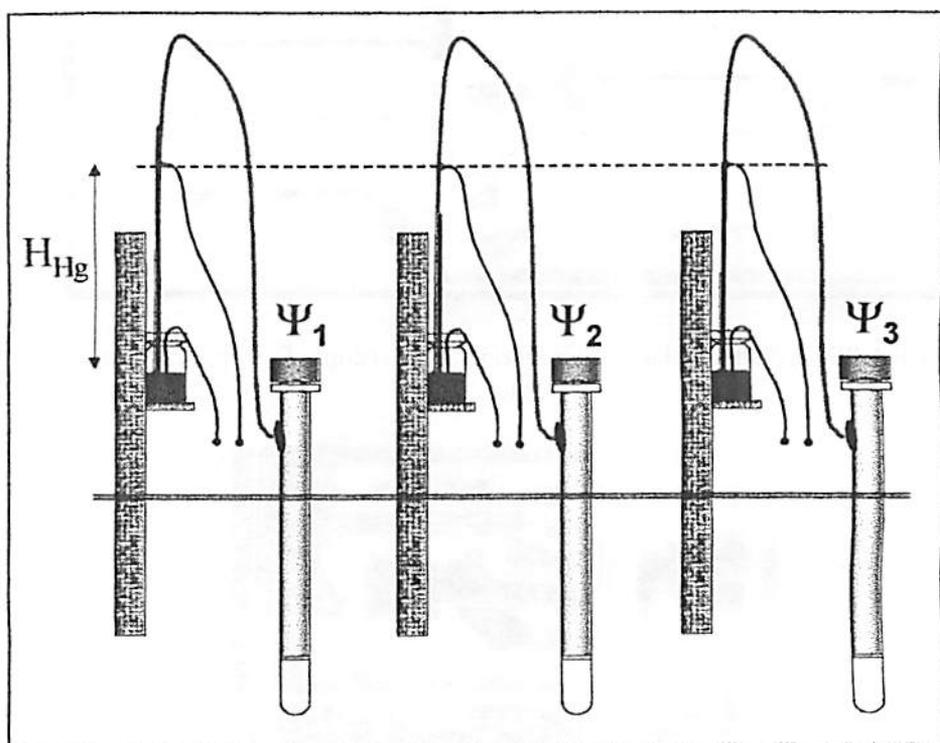


FIGURA 11B: Ilustração do funcionamento dos tensiômetros de mercúrio e estimativa da tensão média.