



WELLINGTON ALVES DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA
ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO**

LAVRAS - MG

2011

WELLINGTON ALVES DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
ALTERNATIVO PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Água e Solo para obtenção de título de Mestre.

Orientador

Prof.Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

LAVRAS - MG

2011

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

Freitas, Wellington Alves de.

Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo alternativo para
estimativa da umidade do solo / Wellington Alves de Freitas. –
Lavras : UFLA, 2011.

93 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.

Bibliografia.

1. Manejo da irrigação. 2. Sensores capacitivos. 3. Tensão de
água no solo. 4. Feijoeiro. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 621.315

WELLINGTON ALVES DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
ALTERNATIVO PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Água e Solo para obtenção de título de Mestre.

Aprovada em 24 de fevereiro de 2011.

Dr. Geraldo Magela – UFLA

Dr. Gilberto Coelho – UFLA

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

Orientador

LAVRAS - MG

2011

AGRADECIMENTOS

Ao Altíssimo Deus, pela oportunidade de contemplar sua obra, por permitir o conhecimento de sua palavra proporcionando uma vida mais harmoniosa.

Aos meus pais, em especial a minha mãe, pelo amor, confiança e apoio.

As minhas queridas irmãs Elisângela, Edneide e Milene, pelo carinho e incentivo que sempre me deram.

Ao professor Dr. Jacinto de Assunção Carvalho, pelo voto de confiança, por me orientar desde o curso de graduação favorecendo meu crescimento profissional e pessoal.

Aos professores coorientadores, Dr. Roberto Alves Braga Jr. do DEG/UFLA, Dr. Messias José Bastos de Andrade do DAG/UFLA, Dr. Wilian Lacerda Soares do DCC/UFLA.

Ao professor Dr. Marcelo de Oliveira Silva do DEX/UFLA, pela ajuda nas análises estatísticas.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização deste trabalho.

A CAPES, pela bolsa concedida.

Agradeço imensamente.

RESUMO

O Brasil é donatário de um dos patrimônios hídricos mais importantes do mundo, tal posição coloca o país no alvo de críticas quanto ao uso dos recursos hídricos. Pesquisadores e empresas, tem se empenhado no desenvolvimento de instrumentos eletrônicos capazes de monitorar grandezas do ambiente agrícola em tempo real. Entretanto, o custo tem sido um dos fatores limitantes na adoção de tais instrumentos. A proposta deste trabalho é o desenvolvimento e avaliação de um dispositivo de baixo custo, para estimar a umidade do solo. O dispositivo consiste num capacitor de forma cilíndrica, sendo os eletrodos de cobre. O gesso tipo IV foi usado como um dos materiais dielétricos. A partir da curva de retenção de água no solo, foram relacionados os valores de capacitância (μF) com as umidades (Θ) correspondentes, e essa com os valores de tensão de água no solo (kPa). Para avaliação dos capacitores foram realizados três experimentos, com a cultura do feijoeiro. No primeiro experimento foi utilizado delineamento inteiramente casualizado, com cinco tensões (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa e 120 kPa) utilizando para o manejo da irrigação, capacímetro digital. No segundo experimento foi utilizado delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (2x3) sendo dois métodos de manejo da irrigação (tensiômetro x capacitores) e três tensões (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa). No terceiro experimento foi utilizado delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (2x2) sendo dois métodos de manejo da irrigação (sensor de matriz granular x capacitores) e duas tensões (80 kPa, 120 kPa). Foram avaliados nos três experimentos: a variação das grandezas tensões de água no solo e capacitância ao longo do ciclo da cultura para todos métodos, volume de água aplicado, número de irrigações, número de vagens por planta, número de grãos por planta, massa de grãos por planta, massa de 100 grãos e eficiência de uso da água. Verificou-se que todos os métodos apresentaram variações nas grandezas mensuradas. Os capacitores foram mais susceptíveis a variação de umidade, tendo implicações no maior volume de água aplicada e número de irrigações. O sinal advindo do capacímetro não foi adequado, pois, proporcionou o fenômeno de eletrólise. Sanadas tais observações, o dispositivo tem potencial para ser empregado, devido seu baixo custo.

Palavras chave: Recursos hídricos. Manejo da irrigação. Capacitores.

ABSTRACT

Brazil is a grantee of the most important water assets in the world; this position makes the country subject to criticism regarding the use of water resources. Researchers and companies have been engaged in the development of electronic instruments which are able to monitor quantities of agricultural environment in real time. However, the cost has been a limiting factor in the adoption of such instruments. The purpose of this work is the development and evaluation of a device for estimating soil moisture at low cost. The device consists of a cylindrical capacitor and the copper electrodes. The type IV plaster was used as a dielectric material. From the curve of water retention in the soil, there were related values of capacitance (μF) to the moisture content (Θ) which correlates with the soil water tension values (kPa). Three experiments were conducted for the evaluation of the capacitors of the bean crop. In the first experiment, a randomized design was used with five soil water tensions (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa and 120 kPa) using irrigation management with the digital capacimeter. In the second experiment, a randomized design was used with a factorial (2x3) arrangement, two irrigation dealing methods (tensiometer x capacimeter) and three soil water tensions (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa). In the third experiment, a randomized design was used with a factorial (2x2) arrangement, two irrigation dealing methods (granular matrix sensor x capacitors) and two soil water tensions (80 kPa, 120 kPa). The following was evaluated in the three experiments: the variation of the soil water tensions and capacitance throughout the crop cycle for all methods, applied volume, number of irrigation, number of beans per plant, number of grains per plant, weight of grains per plant, weight of 100 grains and water use efficiency. It was found that all methods showed variations in measured quantities. The capacitors were more susceptible to moisture variation, with implications for the larger volume of water applied and the number of irrigations. The signal coming from the capacimeter was not adequate because it brought the phenomenon of electrolysis. Making corrections from these observations, the device has the potential to be employed due to its low cost.

Keywords: Water resources. Irrigation scheduling. Capacitors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Vazão de retirada para uso animal (A) e irrigação (B).....	18
Figura 2	Material dielétrico e fôrmas: gesso em pó (a), mistura gesso e água (b) e fôrmas de alumínio (c)	27
Figura 3	Materiais utilizados na construção dos SA: tubos de cobre (a), tubos de PVC (b), solda a base de estanho (c), fio paralelo 1mm ² (d), ferro de solda (e), paquímetro digital (f) .	28
Figura 4	Etapas da construção dos capacitores: cortador de cobre (a), inserção do eletrodo externo (b), soldagem de fio paralelo-eletrodo externo (c), preenchimento das fôrmas (d), inserção do eletrodo interno (e), período de secagem (f), solda de fio paralelo-eletrodo interno (g), capacitores cilíndricos (h).....	29
Figura 5	Disposição dos SA nos vasos de polietileno para calibração..	33
Figura 6	Capacitores submetidos à pressão, para calibração	34
Figura 7	Representação esquemática da instalação dos tensiômetros...	35
Figura 8	Croqui da área experimental (experimento 1).....	36
Figura 9	Croqui da área experimental (experimento 2 e 3)	37
Figura 10	Área experimental	39
Figura 11	Representação esquemática do sistema de tutoramento	42
Figura 12	Contato SA-Solo	84
Figura 13	Fenômeno de eletrólise.....	85
Gráfico 1	Curva de retenção do solo utilizado no experimento.....	31
Gráfico 2	Registro das temperaturas no interior da casa de vegetação ...	45
Gráfico 3	Registro das umidades relativas no interior da casa de vegetação	46
Gráfico 4	Teor de água retido relação, 1/2,5	46
Gráfico 5	Teor de água retido, relação 1/4,0	47

Gráfico 6	Teor de água retido no bloco de gesso para diferentes relações	48
Gráfico 7	Comportamento da capacitância, nas diferentes tensões	48
Gráfico 8	Modelo utilizado no manejo da irrigação	49
Gráfico 9	Ajuste de regressão capacitância x umidade volumétrica.....	51
Gráfico 10	Novo modelo ajustado, capacitância x umidade	52
Gráfico 11	Comportamento dos SA, tensão 20 kPa.....	54
Gráfico 12	Comportamento dos SA, tensão 40 kPa.....	55
Gráfico 13	Comportamento dos SA, tensão 60 kPa.....	55
Gráfico 14	Comportamento dos SA, tensão 80 kPa.....	56
Gráfico 15	Comportamento dos SA, tensão 120 kPa.....	57
Gráfico 16	Comportamento dos SA, tensão 20 kPa.....	57
Gráfico 17	Comportamento dos TS, tensão 20 kPa.....	58
Gráfico 18	Comportamento dos SA, tensão 40 kPa.....	59
Gráfico 19	Comportamento dos TS, tensão 40 kPa.....	59
Gráfico 20	Comportamento dos SA, tensão 60 kPa.....	60
Gráfico 21	Comportamento dos TS, tensão 60 kPa.....	61
Gráfico 22	Comportamento dos SA, tensão 80 kPa.....	61
Gráfico 23	Comportamento dos SMG, tensão 80 kPa	62
Gráfico 24	Comportamento dos SA, tensão 120 kPa.....	62
Gráfico 25	Comportamento dos SMG, tensão 120 kPa	63
Gráfico 26	Número de irrigações registrado para cada tratamento	64
Gráfico 27	Volume de água aplicado para cada tratamento.....	64
Gráfico 28	Número de vagens por planta em função das diferentes tensões	66
Gráfico 29	Número de grãos por planta em função das diferentes tensões	67
Gráfico 30	Massa de 100 de grãos em função das diferentes tensões.....	68
Gráfico 31	Eficiência de uso da água em função das diferentes tensões ..	69

Gráfico 32	Volume de água aplicado em função das tensões, utilizando TS	71
Gráfico 33	Número de irrigações utilizando diferentes métodos	72
Gráfico 34	Número de vagens por planta, utilizando SA e TS.....	74
Gráfico 35	Número de grãos por planta, utilizando o SA	75
Gráfico 36	Massa de grãos por planta.....	76
Gráfico 37	Massa de 100 grãos	76
Gráfico 38	Volume de água aplicado, para diferentes tensões e métodos	79
Gráfico 39	Número de irrigações, para diferentes tensões e métodos	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Constante dielétrica de algumas substâncias.....	22
Tabela 2	Granulometria e classificação textural do solo	30
Tabela 3	Resultado da análise química.....	32
Tabela 4	Fertilizantes e doses utilizadas na adubação	38
Tabela 5	Valores de capacitância em função da tensão no gesso.....	49
Tabela 6	Valores de capacitância empregados no manejo da irrigação.	50
Tabela 7	Determinação da capacitância para diferentes umidades do solo	51
Tabela 8	Valores de capacitância em função da umidade do solo.....	53
Tabela 9	Resumo das avaliações	65
Tabela 10	Resumo da análise de variância dos dados relativos ao V_{AP} ...	70
Tabela 11	Valor médio do V_{AP} (litros) em cada método e tensões.....	70
Tabela 12	Resumo das avaliações	72
Tabela 13	Valores médios do N_{VP} em função das tensões e métodos	73
Tabela 14	Valores médios do N_{GP} em função das tensões e métodos	74
Tabela 15	Valores médios da EUA (mg.Litro^{-1})	77
Tabela 16	Resumo da análise de variância dos dados relativos ao V_{AP} ...	78
Tabela 17	Volume médio de água aplicado (Litros.vaso^{-1}).....	78
Tabela 18	Resumo das avaliações	80
Tabela 19	Número médio de vagens para diferentes métodos.....	80
Tabela 20	Número médio de vagens para tensões.....	81
Tabela 21	Valores médios do N_{GP} , para diferentes tensões e métodos....	81
Tabela 22	Valores médios da M_{GP} , para diferentes tensões e métodos ...	82
Tabela 23	Massa média de 100 grãos para diferentes métodos.....	82
Tabela 24	EUA média (mg.Litro^{-1}), para diferentes tensões e métodos ..	83
Tabela 25	Custo dos materiais	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Recursos naturais.....	15
2.2	Agricultura brasileiro.....	16
2.3	Irrigação no Brasil.....	17
2.4	Umidade do solo.....	19
2.4.1	Variabilidade espacial e temporal.....	19
2.4.2	Métodos de determinação da umidade do solo.....	20
2.5	Cultura do Feijoeiro.....	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1	Construção dos sensores alternativos (SA).....	26
3.1.1	Material dielétrico.....	26
3.1.2	Materiais e instrumentos utilizados.....	27
3.2	Calibração dos SA.....	30
3.2.1	Especificações do Capacímetro.....	30
3.2.2	Solo utilizado no experimento.....	30
3.2.3	Correlação capacitância x umidade do solo.....	33
3.2.4	Correlação capacitância x tensão de água no gesso.....	33
3.3	Construção e instalação dos tensiômetros (TS).....	34
3.4	Sensores de matriz granular (SMG).....	35
3.5	Delineamento Experimental.....	36
3.6	Adubação.....	37
3.7	Sistema de irrigação.....	38
3.8	Instalação dos experimentos.....	39
3.9	Semeadura e manejo inicial.....	39
3.10	Manejo da irrigação.....	40
3.11	Cultivar de feijoeiro.....	41
3.12	Práticas culturais.....	41
3.12.1	Tutoramento.....	41
3.12.2	Controle fitossanitário e adubação.....	42
3.13	Avaliações.....	42
3.13.1	Número de irrigações.....	42
3.13.2	Número de vagens por planta.....	43
3.13.3	Número de grãos por planta.....	43
3.13.4	Massa de grãos por planta.....	43
3.13.5	Massa de 100 grãos.....	43
3.13.6	Eficiência de uso da água.....	44
3.13.7	Avaliação dos capacitores.....	44
3.14	Custo do dispositivo.....	44

3.15	Análises estatísticas.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação.....	45
4.2	Porosidade do bloco de gesso	46
4.3	Ajuste da equação.....	48
4.3.1	Correlação capacitância x tensão de água no gesso.....	48
4.3.2	Correlação capacitância x umidade do solo.....	50
4.4	Métodos de manejo da irrigação.....	53
4.4.1	Experimento 1	53
4.4.2	Experimento 2	57
4.4.3	Experimento 3	61
4.5	Avaliação do experimento 1	63
4.5.1	Número de irrigações e volume de água aplicado	63
4.5.2	Resumo das avaliações	65
4.6	Avaliação do experimento 2	69
4.6.1	Número de irrigações e volume de água aplicado	69
4.6.2	Resumo das avaliações	72
4.7	Avaliação do experimento 3	77
4.7.1	Número de irrigações e volume da água aplicado	77
4.7.2	Resumo das avaliações	80
4.8	Avaliação dos sensores alternativos	83
4.9	Custo dos sensores alternativos.....	86
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é donatário de um dos patrimônios hídricos mais importantes do mundo, tal posição coloca o país no alvo de críticas quanto ao uso dos recursos hídricos, principalmente o setor agropecuário, o qual desempenha papel importante na economia brasileira, tanto no mercado interno, através do abastecimento de alimentos, quanto na geração de excedentes exportáveis.

Segundo o Plano Nacional dos Recursos Hídricos, 69% da água consumida no Brasil tem utilização na agricultura irrigada, com eficiência média de 64%, ou seja, 36% da água derivada para irrigação no país constituem-se em perdas por condução e por distribuição nas infraestruturas hidráulicas, provocando um grande desperdício no uso da água na agricultura (ITABORAHY et al., 2004). Assim, a implantação de um projeto de irrigação além de atender a legislação ambiental, deve adotar critérios técnicos durante o ciclo de determinada cultura que melhore o uso da água, a fim de mitigar os possíveis efeitos adversos provenientes da agricultura irrigada. Dentre os principais problemas encontrados na agricultura irrigada merece destaque a baixa taxa de utilização de técnicas de manejo da irrigação, com desperdício de água e energia (ITABORAHY et al., 2004). Vale ressaltar, que produtividade agrícola está relacionada intimamente com os atributos físico-hídricos do solo, sendo de capital importância o monitoramento de alguns desses atributos, destacando-se a umidade do solo, pois, indica em que condições hídricas ele se encontra.

A evolução dos dispositivos do estado sólido (microcontroladores, IGBT, amplificadores operacionais) utilização de sistemas de controle e automação, sensores e atuadores nos últimos anos, estabeleceram uma série de inovações tecnológicas que permitiram, dentre outras aplicações, a alocação dos recursos hídricos de forma mais racional nos sistemas agrícolas, reduzindo as

perdas, com conseqüente melhoria na qualidade e quantidade dos produtos explorados.

De fato, a tecnologia eletrônica tem sido uma importante aliada nas diversas atividades, para aperfeiçoamento de processos produtivos. Entretanto, para automatizar os sistemas de irrigação é necessário um estudo de viabilidade, pois, os custos de implantação podem ser significativos, sendo esse, a principal restrição encontrada pela maioria dos usuários da agricultura irrigada. Outro fato a ser mencionado, refere-se aplicabilidade dos instrumentos de gestão de recursos hídricos introduzidos pela lei 9.433/97 e as correspondentes estaduais, em que se faz necessário um maior grau de envolvimento do setor agrícola para se ajustar aos novos padrões e às exigências da sociedade com relação aos aspectos ambientais e de sustentabilidade (ITABORAHY et al., 2004). Destarte, pesquisas científicas envolvendo eletrônica aplicada a sistemas irrigados devem ser fomentadas, com objetivo de buscar soluções que aperfeiçoe o uso da água, e principalmente, a um custo acessível para os produtores rurais, pois, a maioria dos equipamentos eletrônicos são importados e de custo elevado. Diante dessas circunstâncias, o autor do trabalho objetivou com as pesquisas registradas neste trabalho o desenvolvimento e avaliação de um sensor alternativo (SA) para estimar a umidade do solo através da variação de capacitância.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Recursos naturais

A preocupação com a degradação dos recursos naturais e com a sustentabilidade da agricultura tem exigido dos profissionais de Ciências Agrárias o desenvolvimento de tecnologias que forneçam informações realistas de parâmetros agroclimáticos. Nas atividades agrícolas, é imprescindível a adoção de práticas conservacionistas, a fim garantir sustentabilidade em longo prazo, principalmente, para exploração dos recursos solo e água. Dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (2007) indicam que até 2030 será necessário um incremento de 14% de água doce na irrigação para suprir a demanda por alimentos (OLIVEIRA, 2008). Sendo um tema extremamente oportuno, a utilização de mecanismos de gestão dos recursos hídricos ou ações que visem economia de água nos diversos segmentos das atividades agrícolas, é de se esperar que usuários da agricultura irrigada, pesquisadores e poder público tenham um real comprometimento acerca da alocação desses recursos.

No Brasil, estudos ambientais são exigíveis para obter-se uma autorização governamental para realizar atividades que utilizem recursos ambientais ou tenham o potencial de causar degradação ambiental (SÁNCHEZ, 2008). O mesmo autor destaca a Resolução CONAMA 1/86 de 23 de Janeiro de 1986, Art.2º, na qual, encontra-se uma lista de empreendimentos sujeitos à apresentação de um estudo de impacto ambiental, dentre eles, obras hidráulicas para exploração de recursos hídricos. Por considerar que projetos de irrigação podem causar modificações ambientais o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovou, em 30 de agosto de 2001, a Resolução número 284, que

dispõe sobre as normas de licenciamento ambiental de empreendimentos de irrigação.

Dada a importância dos recursos naturais, ações referentes quanto ao uso, manejo e práticas mitigadoras, devem ser fomentadas com a finalidade de garantir viabilidade técnica-econômica dos empreendimentos agrícolas.

2.2 Agricultura brasileira

O desenvolvimento econômico de muitos países depende, basicamente, dos recursos da terra, seja através da exploração mineral ou extrativismo vegetal. Essa última, é responsável pela produção de alimentos, fibras, fármacos ou commodities do agronegócio, tendo implicações expressivas no PIB brasileiro. O setor agrícola tem se destacado cada vez mais no cenário internacional pelos recordes de produtividade. O Brasil exportou US\$ 54,8 bilhões em produtos agrícolas no ano de 2009, o segundo maior valor em exportações desde 1997. Os cinco principais setores foram: complexo da soja, carnes, complexo sucroalcooleiro, café e fumo e seus produtos, representando 84,0% do total das exportações (BRASIL, 2010).

A FAO e a OCDE, na publicação intitulada *Panorama para a Agricultura (2010-2019)*, projetam que o setor agrícola brasileiro terá o maior crescimento do mundo, cerca de 40% até 2019, quando comparado com o período-base de 2007-2009 (BRASIL, 2010). De fato, o agronegócio brasileiro tem impulsionado a economia, com reflexos positivos na geração de divisas e empregos. Entretanto, para ocorrer essa expansão, faz-se necessário investimento em pesquisa e inovações tecnológicas. Silva e Mello (2009), destacam a incorporação de tecnologia na produção de grãos entre 1990 e 2007, com aumento de 126% na produção, para um acréscimo de 21,8% da área explorada. A inovação tecnológica deve fazer parte das diretrizes estratégicas do

agronegócio, visando identificar os cenários de oportunidade e competitividade na cadeia produtiva (JESUS JÚNIOR et al., 2007).

Sem dúvida, a agricultura pode se beneficiar desse avanço tecnológico principalmente, no gerenciamento dos recursos naturais, dentre eles, solo-água. O conhecimento das propriedades como salinidade, temperatura, infiltração de água no solo, condutividade hidráulica, umidade, pressão de preconsolidação, desempenham papel fundamental na produção agrícola, além de colaborar para uma agricultura sustentável. Para o registro contínuo dos parâmetros supracitados, são necessários sensores, sistemas de aquisição de dados e computadores para nortear as decisões quanto ao controle de irrigação, época de colheita, aplicação de fertilizantes, previsão de safra, reduzindo os possíveis riscos de investimento.

2.3 Irrigação no Brasil

O Brasil possui uma superfície territorial de 851 milhões de hectares, e em torno de 29% desta superfície é explorada com agropecuária, ou seja, cerca de 249 milhões de hectares, dos quais 77 milhões com lavouras e 172 milhões com pastagens. Apesar de o potencial de solos, para o desenvolvimento sustentável da irrigação alcançar cerca de 30 milhões de hectares, no país, somente uma pequena parcela é explorada, com pouco mais de 1% da área total irrigada no mundo, que é cerca de 227 milhões de hectares (BRASIL, 2009). No Brasil, o setor da irrigação e pecuária, representam 55% (de um total de 1841,5 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de vazão de retirada, sendo 47% atribuídos a irrigação (BRASIL, 2009). Os dados evidenciam uma vazão considerável destinado ao setor agropecuário. A Figura 1 ilustra a distribuição espacial das vazões de retirada para cada tipo de uso.

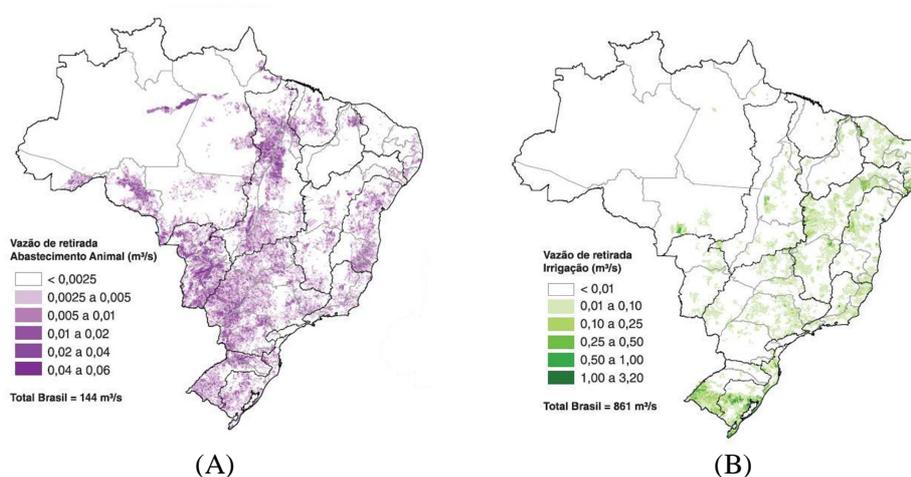


Figura 1 Vazão de retirada para uso animal (A) e irrigação (B)
 Fonte: Adaptada de Brasil (2009)

Assim, na perspectiva de gerir os recursos hídricos, o manejo correto da irrigação carece do emprego de tecnologias compatíveis com o uso eficiente da água. Segundo Itaborahy et al. (2004), dentre os principais problemas encontrados na agricultura irrigada merecem destaque a baixa taxa de utilização de técnicas de manejo da irrigação, com desperdício de água e energia. Estudo realizado pela CEMIG, se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumidas seriam economizadas (CHRISTOFIDIS; FERREIRA; LIMA, 2004).

O manejo da irrigação envolve tomada de decisão sobre quando se irrigar e quantidade de água a ser aplicada. Neste sentido, para auxiliar o usuário da agricultura irrigada a tomar a decisão mais apropriada, diferentes métodos foram desenvolvidos, onde suas principais diferenças referem-se à forma de medição, local de medição, instalação, preço, tempo de resposta e principalmente, operacionalidade no campo (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007). Antes de estabelecer uma estratégia de manejo nas culturas irrigadas, é importante que o técnico e/ou empresário rural esteja ciente da

variabilidade espacial e temporal de alguns atributos físico-hídricos do solo, tendo implicações na escolha do método a ser empregado.

2.4 Umidade do solo

2.4.1 Variabilidade espacial e temporal

A variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos-hídricos, em qualquer nível, é inevitável (HILLEL, c2004). Em condições de campo, a variabilidade espacial e temporal das propriedades do solo torna-se complexa, pois tal variação é uma característica dos fenômenos naturais. De acordo com Resende et al. (2007), a partir do momento em que o solo começa a ser formado, até que o mesmo atinja um estado de equilíbrio dinâmico, a variabilidade espacial dos atributos físicos, químicos, biológicos, morfológicos e mineralógicos começa a existir, sendo mais evidenciada nos solos mais jovens.

Segundo Ávila (2008), estudos sobre variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas do solo, mesmo com aparência homogênea, apresentam considerável variabilidade espacial de suas propriedades físicas. O mesmo autor, estudando a variabilidade espacial de alguns atributos físicos do solo, na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, na Serra da Mantiqueira - MG, concluiu que o teor de água no solo é extremamente variável no espaço e no tempo, mesmo em áreas com solos homogêneos. Dentre os atributos físicos, aqueles que se relacionam com a dinâmica da água no solo, como a condutividade, difusividade hidráulica e a taxa de infiltração, exibem uma alta variabilidade espacial (CICHOTA; JONG VAN LIER; LEGUIZAMON, 2003). A umidade do solo destaca-se pela influência em outras variáveis, notadamente a evapotranspiração, geração de escoamento superficial e transporte de sedimentos (ÁVILA, 2008).

Gontijo (2007), estudando o comportamento da variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois latossolos, na entrelinha do cafeeiro, conclui que a pressão de preconsolidação e a umidade apresentaram moderada dependência espacial. Sendo assim, a caracterização da variabilidade espacial e temporal deve ser uma das prioridades da agricultura moderna.

Em resposta à presença dessa variabilidade dos fatores supracitados, surgiu a agricultura de precisão, um conjunto de técnicas que utiliza de GPS, sensores, controladores e recursos computacionais, que visam auxiliar o acompanhamento da variabilidade espacial e temporal dos atributos de determinada área, tendo como objetivo o aumento de produtividade e o uso mais eficiente dos insumos agrícolas.

2.4.2 Métodos de determinação da umidade do solo

O conhecimento e monitoramento dos atributos físico-hídricos do solo servem de suporte de decisão, para o gerenciamento das práticas agrícolas, além de atenuar os impactos ambientais. Para irrigação, a umidade do solo deve ser determinada para servir de parâmetro no cálculo da quantidade de água a ser aplicada pelo sistema.

De acordo com Shock (1998), a água no solo pode ser medida através de instrumentos que medem teor de água ou tensão de água no solo. A seguir são apresentados alguns métodos para determinação do teor de água do solo:

- a) Gravimétrico;
- b) Sonda de neutrôns;
- c) Reflectometria no domínio do tempo (TDR);
- d) Sensores de capacitância;
- e) Sensores de dissipação de calor;

Existe uma gama considerável de métodos para determinação da tensão de água no solo, dentre os quais se destacam:

- a) Tensiômetros;
- b) Blocos de gesso;
- c) Sensores de matriz granular (SMG);
- d) Psicrômetros;
- e) Extrator de placa porosa;
- f) Diferencial de velocidade.

Além desses métodos, existe ainda o WP4, aonde as medidas do potencial são determinadas através da umidade relativa do ar acima de uma amostra (dentro de uma câmara fechada). No equilíbrio da temperatura, a umidade relativa do ar é uma medida direta do potencial hídrico (CAMPBELL, 2010). Atualmente, os métodos eletrométricos que envolvem grandezas elétricas, vêm ganhando espaço devido a possibilidade de automatizar tanto a aquisição de dados pertinentes as variáveis de interesse (umidade do solo, temperatura, pH, salinidade, etc..) quanto acionamentos de atuadores (válvulas solenóides, motores, chaves magnéticas) no processo de produção agrícola.

Segundo Conklin (c2005), medidas que envolvem eletricidade, todos os parâmetros, (voltagem, corrente, frequência, resistência, capacitância, propriedades dielétricas) podem ser usados individualmente ou em combinação para obter informações sobre o meio, no qual, os elétrons estão se movendo. Roque (2008) desenvolveu um multi-sensor eletrônico, capaz de estimar a umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo, com precisão necessária para usos agrícolas, baseado em propriedades elétricas do solo.

A produção de circuitos integrados e microprocessadores, cada vez mais rápidos e com maior número de elementos, está produzindo uma constante evolução na Eletrônica. Por esta razão, pode-se afirmar que a Eletrônica aliada com a Ciência dos Materiais são os principais fatores para inovação tecnológica,

destacando, por exemplo, os materiais dielétricos. Uma das aplicações mais tradicionais desses materiais é na construção de capacitores, cuja função básica é armazenar carga (REZENDE, 1996).

2.4.2.1 Sensores capacitivos

São sensores amplamente utilizados, seu princípio de funcionamento é baseado na variação de capacitância. Sua dimensão e forma é bastante variada (plana, cilíndrica, “pente”). Capacitância é uma grandeza elétrica que relaciona uma determinada quantidade de carga “q” e a diferença de potencial “U”, tendo como unidade de medida o *Farad* (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2001). Os valores da capacitância podem ser alterados pela distância entre os eletrodos, geometria do capacitor ou natureza do material dielétrico. Michael Farady investigou esse assunto pela primeira vez em 1837, e usando um equipamento simples, descobriu que a capacitância aumentava de um fator numérico *K*, que ele chamou de constante dielétrica do material isolante (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2001). A Tabela 1 apresenta algumas substâncias e suas respectivas constantes dielétricas.

Tabela 1 Constante dielétrica de algumas substâncias

Substâncias	Constante Dielétrica (κ)	Substâncias	Constante Dielétrica (κ)
Ar	1,00054	Água 0 °C	88,0
Madeira	1,2 – 2,1	Água 20 °C	80,4
Nylon	3,5 – 5,0	Água 100 °C	55,3
Vidro	4,0 – 10,0	Silício	11,7 – 12,9
Diamante	5,5 – 10,0	Parafina	2,0 – 2,5

Fonte: Adaptada de Wilson (2005)

Estudo realizado por Mohsen-Nia et al. (2010) para determinar a constante dielétrica de alguns fluídos, dentre eles a água, corroboram o valor da constante dielétrica supracitada. Sendo um material polar, e se esse estiver entre as placas de um capacitor, influenciará acentuadamente as cargas que estão entre tais placas (VLACK, 1973), conseqüentemente, aumentando a capacitância. O valor para o solo seco é de aproximadamente 4. Em contraste, o valor da água é cerca de 80 (FRANGI et al., 2009; RUSINIAK, 2002). Assim, o conteúdo de água do solo determina a sua constante dielétrica (HILLEL, c2004). Fica evidente a variação da capacitância em função do tipo de material entre as placas do capacitor. Entretanto, o tipo de sinal e frequência aplicado no capacitor, tem efeito significativo na capacitância. Segundo Kumhala et al. (2009), as propriedades dielétricas de muitos materiais depende da frequência, teor de água, densidade, composição química, e da associação do momento dipolo permanente da água e outras moléculas constituintes.

Benedetto (2010), avaliando a técnica GPR (Ground Penetration Radar) para determinar o teor de água em solo não-saturado, para aplicações em engenharia de pavimentação, salienta o efeito da frequência no processo de polarização da molécula de água. Chang et al. (2007), desenvolvendo a estrutura de um novo eletrodo, para medir o teor de água, mencionam a consequência da alta frequência (efeito pelicular), onde parte da corrente elétrica passa através da superfície do condutor, tendo influência significativa nos resultados. Além da frequência, a temperatura pode afetar os valores da constante dielétrica (KIZITO et al., 2008; KUMHALA et al., 2009; MOHSEN-NIA et al., 2010). Medir o teor de água do solo pela determinação da capacitância não é uma idéia nova (ANDERSON, 1943; ANDERSON; EDLEFSEN, 1942; PLATER, 1955). Nos últimos anos essa técnica vem sendo explorada de maneira expressiva devido, principalmente, o desenvolvimento de instrumentos eletrônicos mais sofisticados e com aplicações na agricultura irrigada. Oliveira (2008), utilizou

sensores que envolvem variação da capacitância, no manejo da irrigação da cultura da melancia. Freitas et al. (2009), conduzindo experimento no campo e em casa de vegetação, com as culturas da canola e beringela, respectivamente, verificaram correlação entre a capacitância e umidade do solo.

Assim, devido à complexidade e a abrangência do assunto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado e detalhado a fim de identificar as interações das variáveis ambientais no valor da capacitância.

2.5 Cultura do Feijoeiro

O feijão é uma planta do grupo C3, leguminosa que se destaca em vários continentes, sendo uma importante fonte de proteína, fosforo, ferro, vitamina B1 e fibra (MONTEIRO, 2009). O maior consumo desse produto ocorre nas Américas (41,7%), Ásia (34,2%), África (18,6%), Europa (3,8%) e a Oceania (0,1%) (PAULA JÚNIOR et al., 2008). O feijoeiro – comum é uma espécie com sistema radicular superficial. Normalmente, o maior volume de raízes se concentra nos primeiros 20 cm de profundidade e de 80% aos 90% delas se concentram nos primeiros 40 cm (PAULA JÚNIOR et al., 2008). No Brasil, predomina o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris L.*) que é cultivado em quase todo território nacional (MONTEIRO, 2009). Ainda é considerada como cultura de subsistência em pequenas propriedades, embora, nos últimos 25 anos, houve interesse de produtores de outras classes com adoção de tecnologias avançadas (irrigação, colheita mecanizada). Sua cotação no mercado no ano de 2007, apresentou um comportamento atípico, alcançando o valor de R\$ 300,00 por saca, em decorrência de condições climáticas adversas ocorridas em certas regiões do país (PAULA JÚNIOR et al., 2008).

O rendimento do feijoeiro é bastante afetado pela condição hídrica do solo. A deficiência ou excesso de água nos diferentes estádios da cultura causam

redução na produtividade em diferentes proporções (PAULA JÚNIOR et al., 2008). Os mesmos autores, recomendam valores de tensão entre 10 a 40 kPa, pois, representam condições ideais de água e arejamento do solo. A falta de informação ou mesmo a falta de recursos para monitorar as condições hídricas no solo, tem sido um fator limitante para o aumento da produtividade de diversas culturas, segundo Queiroz (2004) a maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação, promovendo desperdício de insumos e inviabilidade econômica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os sensores alternativos (SA) foram construídos no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia. Após essa etapa, realizou-se a calibração de duas maneiras: submetendo os SA a diferentes pressões, através de um sistema pressurizado; e instalando-os em vasos de polietileno preenchidos com solo. Terminado tal procedimento, ajustaram-se equações para realização do manejo da irrigação, utilizando capacímetro. A avaliação dos SA foi realizada por meio de três experimentos com a cultura do feijão.

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação do tipo pavilhão, próximo ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, na cidade de Lavras – Minas Gerais, situado a 913,9 metros de altitude, coordenadas geográficas 21° 14' de Latitude Sul e 45° 00' de Longitude de Greenwich (BRASIL, 1992).

O clima da região é do tipo Cwa, segundo classificação Koppen, caracterizando uma região subtropical com estiagem de inverno. Em termos anuais, a precipitação pluvial é de 1529,7 mm (BRASIL, 1992). O registro da temperatura e da umidade relativa foi realizado com auxílio de um termo-higrômetro digital.

A montagem do sistema de irrigação, bem como adubação e preparo do solo, teve início no dia 09/09/2010. A semeadura foi realizada na primavera, no dia 29/09/2010 e a colheita no dia 15/12/2010, totalizando 77 dias.

3.1 Construção dos sensores alternativos (SA)

3.1.1 Material dielétrico

O material dielétrico utilizado foi gesso pedra especial tipo IV, microgranulado, da marca Herostone (Figura 2a). A escolha do gesso foi devida sua característica higroscópica, fácil moldagem e preço acessível. Foram realizadas diferentes misturas com 3 repetições (água destilada/gesso) a fim de verificar se a distribuição do tamanho de poros interfere no tempo de resposta do capacitor. A mistura foi homogeneizada num bécker (Figura 2b) para, posteriormente, ser moldada nas fôrmas de alumínio (Figura 2c).

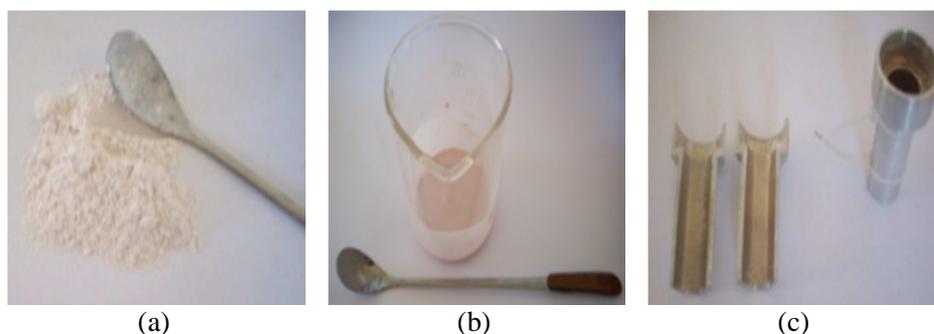


Figura 2 Material dielétrico e fôrmas: gesso em pó (a), mistura gesso e água (b) e fôrmas de alumínio (c)

Após um período de 48 horas de secagem ao ar, o bloco de gesso foi retirado da fôrma de alumínio. Para verificar a taxa de evaporação da água do bloco nas diferentes misturas, o mesmo foi saturado durante 24 horas em seguida, determinou-se a massa de água no bloco ao longo do tempo.

3.1.2 Materiais e instrumentos utilizados

Os SA usados no experimento foram construídos utilizando um formato cilíndrico e testados no Laboratório de Hidráulica do DEG. Para sua construção foi utilizado tubos de cobre com 15 e 22 mm de diâmetro externo (eletrodos),

tubo de PVC de $\frac{3}{4}$, solda à base de estanho, fio paralelo de cobre de 1 mm^2 , ferro de solda e paquímetro digital, conforme Figura 3.

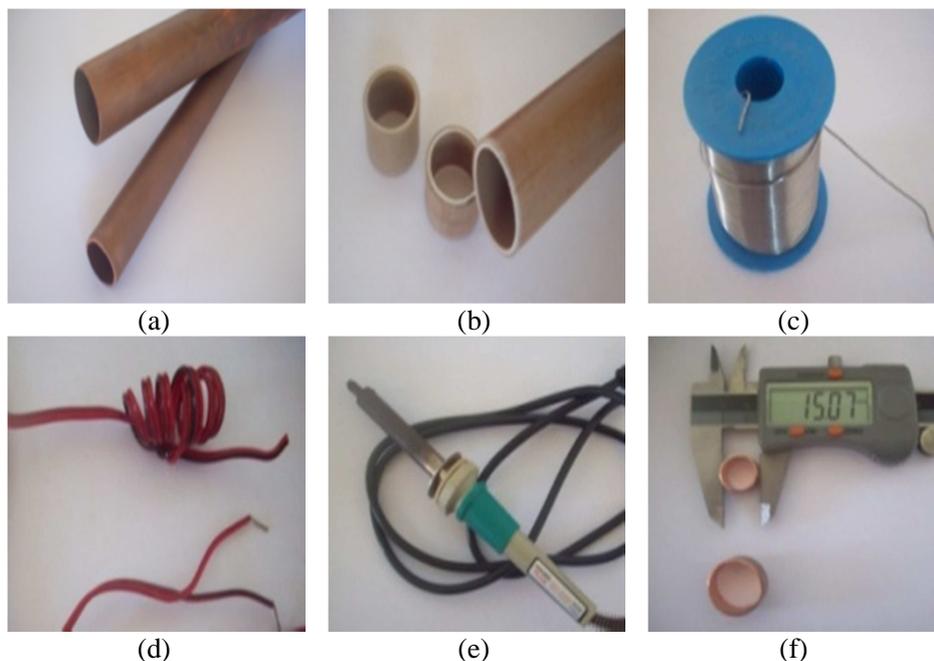


Figura 3 Materiais utilizados na construção dos SA: tubos de cobre (a), tubos de PVC (b), solda a base de estanho (c), fio paralelo 1 mm^2 (d), ferro de solda (e), paquímetro digital (f)

Utilizando cortador específico, realizou o corte dos tubos de cobre e de PVC nas dimensões adotadas (12 mm e 14 mm) respectivamente (Figura 4a). Em seguida, o eletrodo de 22 mm de diâmetro foi ajustado no interior do tubo de PVC, para não haver contato do eletrodo com o solo (Figura 4b). A etapa seguinte consistiu em soldar o fio paralelo 1 mm^2 no interior do eletrodo (Figura 4c). Na sequência, esse conjunto foi colocado na fôrma de alumínio para preenchimento com a mistura água/gesso (Figura 4d), após 5 minutos o eletrodo de 15 mm de diâmetro foi inserido no interior do eletrodo de 22 mm de maneira concêntrica (Figura 4e). Após secar ao ar (Figura 4f) durante um período

mínimo de 24 horas, esse conjunto foi retirado da fôrma de alumínio para soldagem do outro terminal no eletrodo menor (Figura 4g). Terminado a construção dos SA, prosseguiu-se com a calibração.



Figura 4 Etapas da construção dos capacitores: cortador de cobre (a), inserção do eletrodo externo (b), soldagem de fio paralelo-eletrodo externo (c), preenchimento das fôrmas (d), inserção do eletrodo interno (e), período de secagem (f), solda de fio paralelo-eletrodo interno (g), capacitores cilíndricos (h)

3.2 Calibração dos SA

3.2.1 Especificações do Capacímetro

Para mensurar a capacitância utilizou-se um capacímetro digital da marca ICEL, modelo CD - 300 com escala de 200 pF a 20 miliF. A tensão máxima de saída nos terminais é de $2,8 V_{rms}$. A frequência do sinal aplicado varia conforme a escala do aparelho, no experimento a escala utilizada foi 2000 μ F com resolução de 1 μ F e frequência de 8 Hz, segundo manual do fabricante.

3.2.2 Solo utilizado no experimento

O solo utilizado foi coletado no campus da UFLA na camada subsuperficial (de 0,10 m a 0,40 m de profundidade), sendo classificado como Latossolo Vermelho Distroférico segundo novo sistema hierarquizado (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2006) de classe textural argilosa. O mesmo foi submetido à tamisação utilizando peneira com malha de 5 mm², em seguida, realizou-se a coleta de uma amostra composta representativa para análises física e química. Tais análises foram realizadas nos Laboratórios de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. Na Tabela 2 é apresentado o resultado da análise física para classificação textural do solo.

Tabela 2 Granulometria e classificação textural do solo

Identificação	Areia Silte Argila			Classe Textural
	dag/kg			
Amostra 1	23	19	58	Argilosa

Fonte: Laboratório de Física do Solo – DCS/UFLA

No mesmo laboratório foi determinada a curva de retenção de água no solo (Gráfico 1). Os parâmetros da curva de retenção de água no solo foram obtidos baseados no modelo proposto por Genuchten (1980), com auxílio do aplicativo *Solver* do programa Microsoft Excel®.

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

Em que:

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

Ψ_m = Tensão, kPa

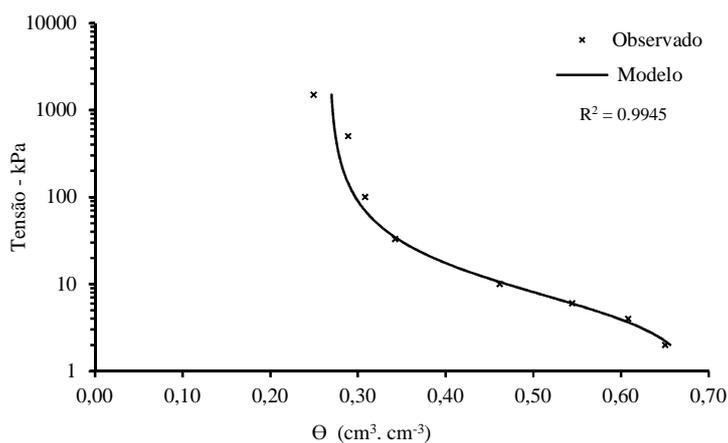


Gráfico 1 Curva de retenção do solo utilizado no experimento

A capacidade de campo foi estimada através da equação proposta por Dexter (2004), em que: α , n e m são os parâmetros da curva de retenção.

$$\Psi_{m_i} = \frac{1}{\alpha} \times \left[\frac{1}{m} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

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

Em que:

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

Ψ_{mi} = Tensão no ponto de inflexão da curva, kPa.

O valor de umidade na capacidade de campo encontrado foi de 0,514 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ para uma tensão de 7 kPa. Realizou-se a caracterização química do solo (Tabela 3) para fins de adubação e correção de pH.

Tabela 3 Resultado da análise química

Siglas	Descrição	Unidade	Determinação
pH	Solo	-	6,6
P	Fósforo	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	6,2
K	Potássio	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	73
Na	Sódio	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	4,6
Ca^{2+}	Cálcio	$\text{cmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	3,8
Mg^{2+}	Magnésio	$\text{cmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	0,3
Al	Alumínio	$\text{cmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	0
H+Al	Acidez Potencial	$\text{cmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	1,3
SB	Soma de bases	$\text{cmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	4,3
(T)	CTC a pH 7,0	$\text{cmolc} \cdot \text{dm}^{-3}$	5,6
t	Capacidade de troca catiônica efetiva	$\text{cmol} \cdot \text{dm}^{-3}$	4,3
Prem	Fósforo remanescente	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2,6
V	Saturação de bases	%	76,3
m	Saturação por alumínio	%	0,0
MO	Matéria orgânica	$\text{dag} \cdot \text{Kg}^{-1}$	1,3
Zn	Zinco	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	10,5
Fe	Ferro	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	32,7
Mn	Manganês	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	31,7
Cu	Cobre	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	2,7
B	Boro	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	0,2
S	Enxofre	$\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	30,1

Fonte: Laboratório de Física do Solo – DCS/UFLA

3.2.3 Correlação capacitância x umidade do solo

Inicialmente, o solo foi homogeneizado em um recipiente (Figura 5a), após esse procedimento coletou-se uma amostra composta do solo para determinação da umidade da terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida, quatro capacitores foram instalados em dois vasos de polietileno (Figura 5b) contendo sete litros de solo. Os vasos foram vedados com lona plástica para não ocorrer evaporação da água. Após um período de 48 horas, a capacitância foi determinada submetendo cada SA a um tempo de carga correspondente a um minuto. Realizou tal procedimento para vários valores de umidade do solo (determinada pelo método padrão de estufa), com a finalidade de correlacionar teor de água no solo e a capacitância.

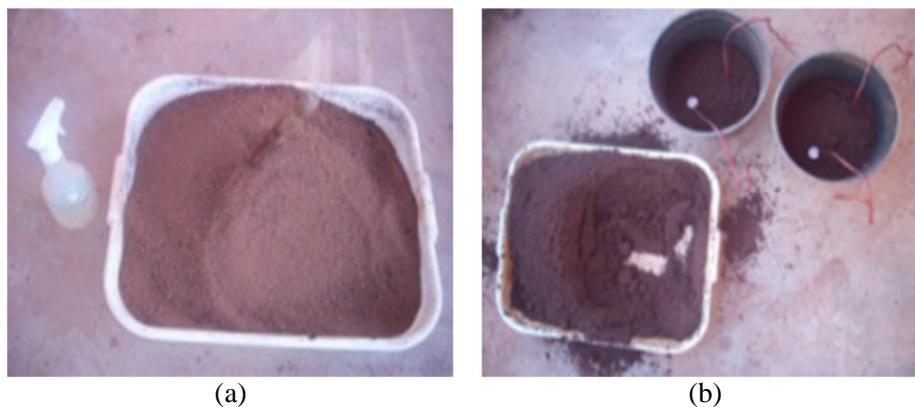


Figura 5 Disposição dos SA nos vasos de polietileno para calibração

3.2.4 Correlação capacitância x tensão de água no gesso

A primeira etapa deste processo de calibração consistiu em saturar quatro SA (água destilada) por no mínimo 24 horas. Em seguida, os mesmos foram inseridos em quatro cápsulas, e submetidas a diferentes valores de

pressão. Para esse procedimento utilizou-se um sistema pressurizado com mangueiras de PVC, as quais estavam conectadas a um compressor para forçar a retirada de água dos SA (Figura 6). Para cada valor de pressão aplicada (20 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa), a capacitância foi determinada submetendo cada capacitor à um tempo de carga correspondente a um minuto. Para o monitoramento da pressão utilizou-se um manômetro digital da marca GULTON, modelo GULpress 1000. Os SA permaneceram dentro das cápsulas, sob pressão, durante um período de 90 horas. A partir deste momento, correlacionou-se tensão de água no dielétrico com o valor médio da capacitância.

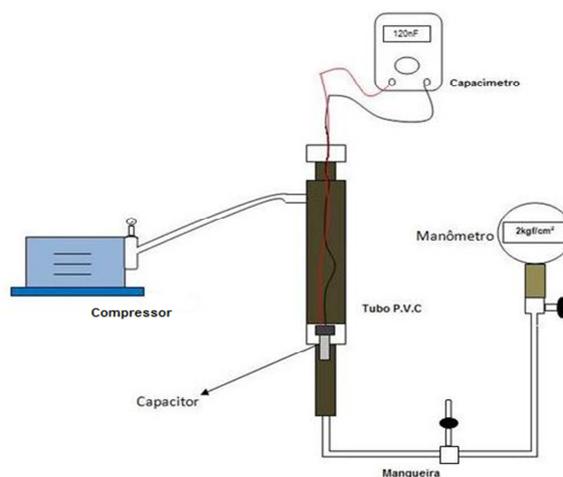


Figura 6 Capacitores submetidos à pressão, para calibração

3.3 Construção e instalação dos tensiômetros (TS)

Os TS utilizados no segundo experimento foram construídos e testados no Laboratório de Hidráulica do DEG. Foram utilizados tubos de PVC branco

de 12 mm, cápsulas cerâmicas, tubos de acrílico 8 mm de diâmetro, rolha de borracha e cola epóxi. Antes de realizar os testes, os TS permaneceram 24 horas submersos em água para saturação das cápsulas. Após esse período, os mesmos foram colocados dentro de recipiente contendo água e submetidos a uma pressão interna de 150 kPa através de um compressor. Tal procedimento teve objetivo de identificar possíveis vazamentos. Efetuado o teste, as cápsulas dos tensiômetros permaneceram imersas em água. Posteriormente, foram instalados nos vasos de polietileno com capacidade de 18,00 litros, sendo 15,33 litros ocupados com solo (Figura 7) a uma profundidade de 0,15 m. Para evitar perda de solo, uma tela de sombrite foi instalada no fundo do vaso.

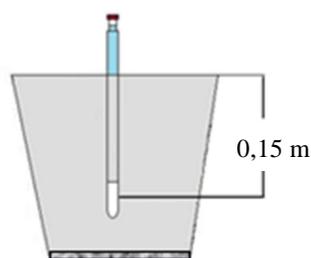


Figura 7 Representação esquemática da instalação dos tensiômetros

3.4 Sensores de matriz granular (SMG)

Para o terceiro experimento (altas tensões), foram utilizados seis SMG. Antes de instalar tais sensores, esses foram saturados durante 24 horas. Após esse procedimento, realizou-se a instalação nos vasos de polietileno a uma profundidade de 15 cm. As leituras da tensão de água no solo foram coletadas diariamente através do leitor digital Watermark®.

3.5 Delineamento Experimental

Foram conduzidos três experimentos com delineamento inteiramente casualizado (DIC). No primeiro experimento, no qual, os SA foram calibrados com a umidade do solo, com 5 tratamentos e 5 repetições, em um total de 25 parcelas experimentais (Figura 8). Tais tratamentos foram submetidos aos seguintes valores de tensão 20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa, 120 kPa.

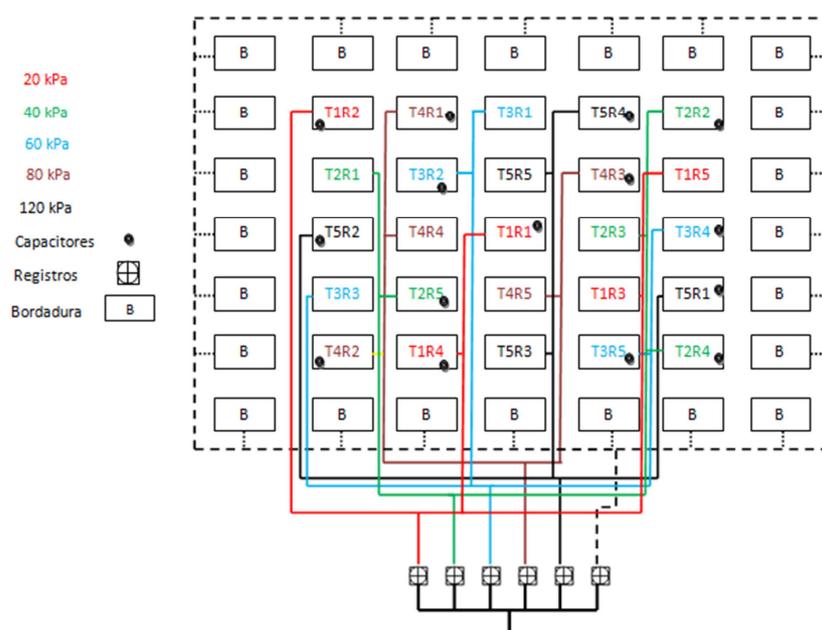


Figura 8 Croqui da área experimental (experimento 1)

No segundo e terceiro experimento, os SA foram calibrados com uso do compressor (pressão aplicada). No segundo experimento foi utilizado DIC com 5 repetições e esquema fatorial, sendo 2x3 tratamentos (SA - TS) nas tensões 20kPa, 40kPa, 60kPa, totalizando 30 parcelas experimentais.

No terceiro experimento foi utilizado DIC, com 5 repetições e esquema fatorial 2x2 (SA - SMG) nas tensões 80 kPa, 120 kPa, totalizando 20 parcelas experimentais. A Figura 9 ilustra a disposição dos vasos de ambos os experimentos, sendo que, cada vaso foi considerado uma parcela com três plantas de feijão.

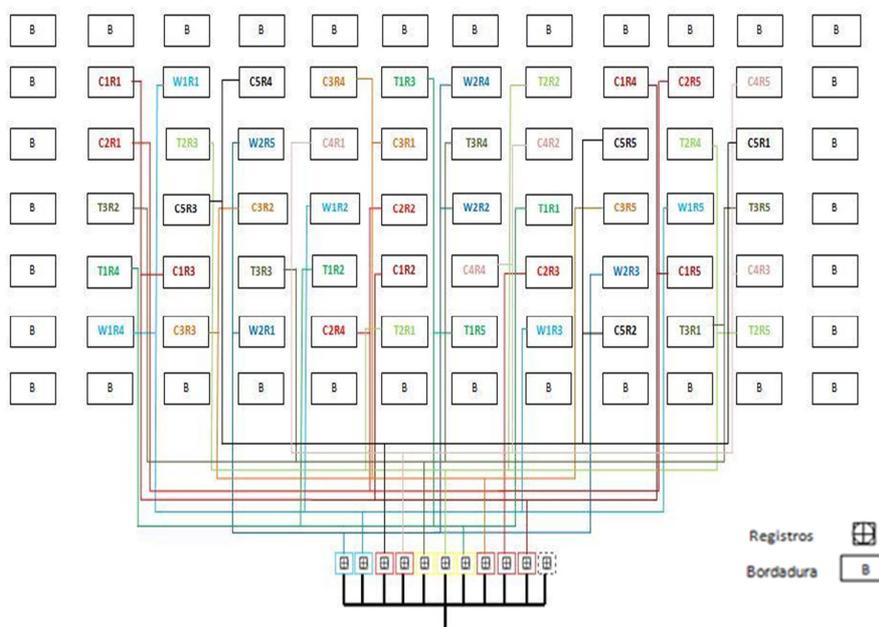


Figura 9 Croqui da área experimental (experimento 2 e 3)

3.6 Adubação

Através dos resultados da análise química do solo, verificou-se que o pH estava dentro da faixa aceitável para a cultura do feijão, não havendo a necessidade de calagem. A adubação com NPK e Boráx ocorreu 30 dias antes da semeadura (Tabela 4). Inicialmente os fertilizantes foram misturados ao solo de maneira homogênea, para posterior enchimento dos vasos.

Tabela 4 Fertilizantes e doses utilizadas na adubação

Fertilizante	Nutriente	Dose (gramas/vaso)
Cloreto de Potássio (58% de K ₂ O)	K	0,30
Boráx (11% de B)	B	0,10
Nitrato de Cálcio (15,4% de N)	N	2,00
MAP (60% de P ₂ O ₅)	P	1,20

3.7 Sistema de irrigação

Para os três experimentos, adotou-se o sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes da marca Netafin, com vazão de 4 L.h⁻¹. As linhas laterais tinham início no cabeçal de controle sendo composto por fonte de água pressurizada por gravidade. Para conexão dos gotejadores à linha lateral utilizou-se microtubos flexíveis de 80 cm de comprimento.

Após a montagem do sistema de irrigação, realizou-se avaliação da uniformidade de vazão, através da equação (4).

$$CU = \left(\frac{q_{25\%}}{q_{média}} \right) \quad (4)$$

Em que:

CU = Coeficiente de uniformidade da vazão, decimal;

q_{25%} = média de 25% das menores vazões, L.h⁻¹;

q_{média} = média geral, L.h⁻¹.

Para o experimento 1, o CU foi de 0,95 e para os experimentos 2 e 3 foram de 0,94. Tais resultados estão de acordo com os valores recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1986).

3.8 Instalação dos experimentos

Os experimentos foram montados em casa de vegetação do tipo pavilhão com estrutura metálica, cobertura de plástico e sombrite nas laterais. No primeiro experimento, os vasos com as plantas foram dispostos em 7 fileiras, contendo cada uma 7 vasos, num total de 49 vasos (Figura 10a). Para o segundo e terceiro experimento, os vasos foram dispostos em 7 fileiras com 12 vasos cada, num total de 84 vasos (Figura 10b). Os vasos foram colocados em cima de uma bancada feita com tábua e apoiadas sobre tijolos.



(a)



(b)

Figura 10 Área experimental

3.9 Semeadura e manejo inicial

Após a distribuição dos vasos, montagem e teste do sistema de irrigação, foram semeadas, com o solo na capacidade de campo, cinco sementes em cada vaso, a uma profundidade de 1 cm. A emergência das plântulas ocorreu com 4

dias após a semeadura (DAS). Aos 6 DAS efetuou-se o desbaste, deixando as três melhores plantas de cada vaso. Todos os tratamentos, inclusive as bordaduras, receberam o mesmo volume de água, correspondente a capacidade de campo até os 9 DAS. A partir dos 10 DAS iniciou-se a diferenciação entre os tratamentos.

3.10 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado com base na curva de retenção de água no solo e leitura média dos SA, TS e SMG. Foram instalados três dispositivos por tratamento. A irrigação era realizada toda vez que a tensão de água no solo atingia o valor estipulado para cada tratamento. As leituras foram realizadas diariamente no período da tarde. O volume de água a ser aplicado pela irrigação foi calculado pela equação (5).

$$V = (\theta_c - \theta_{\text{trat}}) \times V_{\text{solo}} \quad (5)$$

Em que:

V = Volume de água a ser aplicado, em ml;

θ_c = Umidade na capacidade de campo, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

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

V_{solo} = Volume de solo, em ml.

Para o presente experimento o volume de solo contido no vaso foi de 15330 ml.

3.11 Cultivar de feijoeiro

Utilizou-se a cultivar BRSMG Majestoso, pertencente ao tipo carioca. As sementes utilizadas foram fornecidas pelo Departamento de Agricultura (DAG/UFLA). Tal cultivar destaca-se pela produtividade e resistência às raças 55, 89, 95 e 453 de *Colletotrichum lindemuthianum* (PAULA JÚNIOR et al., 2008).

3.12 Práticas culturais

Ao longo do ciclo da cultura, foi realizada a capina manual nos vasos quando pertinente. Inspeções visuais foram feitas a fim de identificar possíveis pragas e/ou ocorrência de doenças. Tais informações serviram de suporte na tomada de decisão referente a necessidade de correções nutricionais e controle fitossanitário.

3.12.1 Tutoramento

A cultivar utilizada apresenta hábito de crescimento indeterminado. Foi necessário tutorar as plantas (Figura 11), linhas de polietileno foram anexadas as bordas dos vasos, por onde as estruturas vegetais (pedúnculos) foram se desenvolvendo.

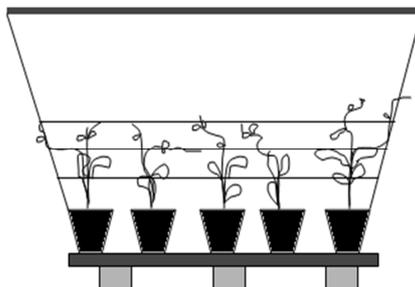


Figura 11 Representação esquemática do sistema de tutoramento

3.12.2 Controle fitossanitário e adubação

Transcorridos 17 DAS observou-se lesões na área foliar de algumas plantas, devido a presença de tripes. No dia posterior, efetuou-se a aplicação $6,25 \text{ g.L}^{-1}$ do inseticida Orthene 750 BR. Aos 24 DAS aplicou-se $1,20 \text{ g.vaso}^{-1}$ de sulfato de amônia (20% N) conforme recomendação técnica.

3.13 Avaliações

Ao longo do experimento avaliou-se o comportamento dos SA, TS e SMG, a fim de identificar seu tempo de resposta, número de irrigações, produção do feijoeiro nas diferentes tensões de água no solo.

3.13.1 Número de irrigações

O número de irrigações foi registrado em planilha eletrônica. Ao longo do ciclo da cultura, mensurou-se o volume de água aplicada para os diferentes tratamentos.

3.13.2 Número de vagens por planta

Aos 77 DAS, as vagens foram colhidas e contadas para análise posterior. Tais dados foram expressos em número médio de vagens por planta.

3.13.3 Número de grãos por planta

Os grãos das vagens de cada parcela experimental foram extraídos e contados, esses resultados foram expressos em número médio de grãos por planta.

3.13.4 Massa de grãos por planta

Avaliou-se a produção de cada tratamento (gramas/planta) determinando a massa de grãos secos (13% b.u), utilizando o método padrão de estufa.

3.13.5 Massa de 100 grãos

Avaliou-se a massa de 100 grãos de cada planta (13% b.u), como o número de grãos foi menor que 100 utilizou a equação 6.

$$M_{100} = 100 \times \frac{M_a}{N_{ga}} \quad (6)$$

Em que:

M_{100} = massa de 100 grãos, (gramas);

M_a = massa da amostra, (gramas);

N_{ga} = número de grãos da amostra.

3.13.6 Eficiência de uso da água

Foi relacionado à produção de cada planta com o volume médio consumido, a fim de calcular a eficiência do uso da água (mg. L^{-1}).

3.13.7 Avaliação dos capacitores

Após a realização do experimento, os capacitores foram retirados dos vasos a fim de verificar seu estado físico, sua interação com o solo e possíveis reações químicas. Esse procedimento foi realizado por meio da visualização dos eletrodos dentro do gesso.

3.14 Custo do dispositivo

A estimativa do custo do dispositivo foi realizada por meio da pesquisa dos preços dos materiais empregados na construção dos capacitores.

3.15 Análises estatísticas

As análises de variância e o teste de média foram realizados utilizando-se o Software SISVAR, versão 5.3 Build 75 (FERREIRA, 2000). Para comparação das médias dos métodos utilizou-se o teste Scott-Knott aos 5 % de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação

No Gráfico 2 são apresentadas as variações diárias das temperaturas, mínimas, médias e máximas no interior da casa de vegetação.

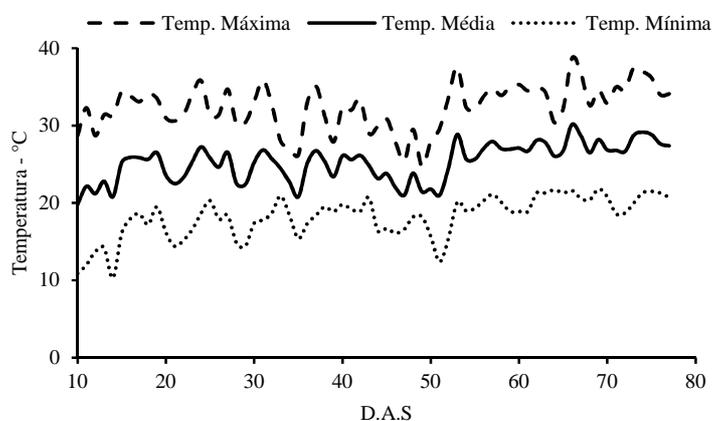


Gráfico 2 Registro das temperaturas no interior da casa de vegetação

A temperatura média do ar ao longo do experimento, no interior da casa de vegetação, foi de 25,30 °C. Segundo Monteiro (2009), para que o feijoeiro atinja seu rendimento potencial é necessário que a temperatura apresente valores mínimo, ótimo e máximo de 12 °C, 21 °C e 29 °C, respectivamente. O mesmo autor destaca a faixa de umidade de 50 % a 60 % e temperatura do ar em torno de 26 °C, sendo as melhores condições climáticas para a produção de sementes. No Gráfico 3 são mostradas as variações diárias das umidades relativas, mínimas, médias e máximas. A umidade relativa média no interior da casa de vegetação foi de 61,34 %.

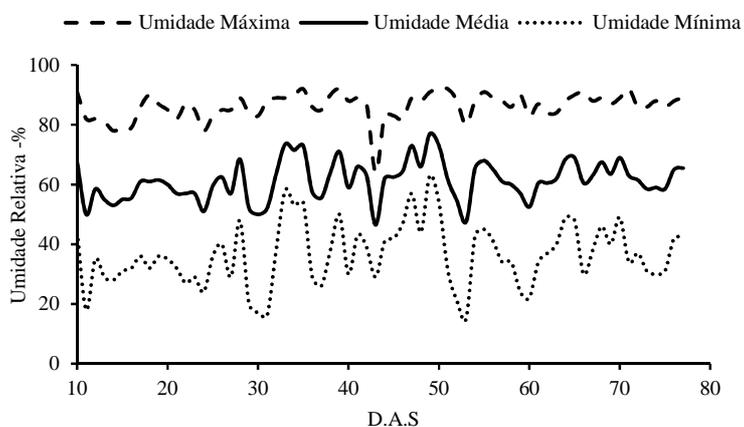


Gráfico 3 Registro das umidades relativas no interior da casa de vegetação

4.2 Porosidade do bloco de gesso

A taxa de evaporação de água no bloco de gesso teve comportamento distinto para as diferentes relações (água/gesso). No Gráfico 4 é mostrada o teor de água retido ao longo do tempo (com três repetições) para relação 1/2,5.

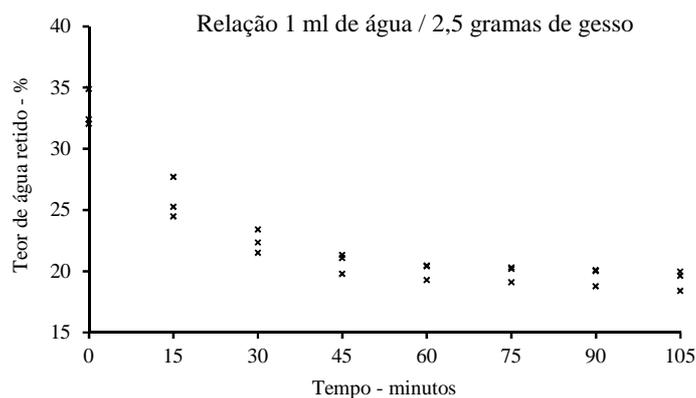


Gráfico 4 Teor de água retido relação, 1/2,5

Persson et al. (2006), desenvolvendo sensor para determinação da tensão de água no solo com tecnologia TDR, comprovaram que a relação água/gesso afeta a distribuição do tamanho dos poros. No Gráfico 5 é mostrado que o teor de água retido (com três repetições) num bloco mais denso, apresentou menor variação ao longo do tempo.

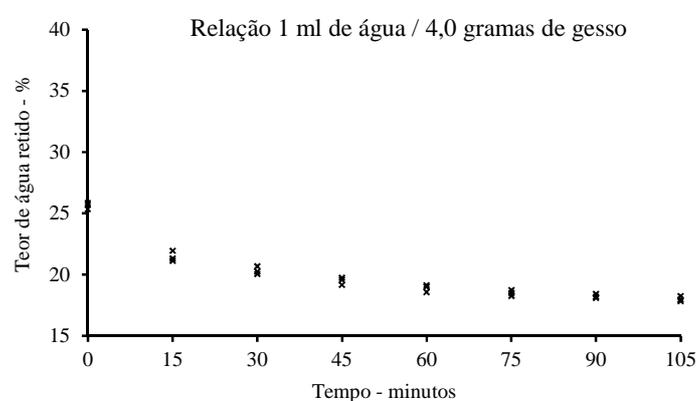


Gráfico 5 Teor de água retido, relação 1/4,0

De fato, esse comportamento pode ter influenciado o tempo de reposta do capacitor durante o manejo de irrigação, pois, sendo o dielétrico mais poroso, a água no seu interior pode mover-se com maior facilidade em relação a um bloco de maior densidade. O Gráfico 6 evidencia a diferença do teor de água retido para duas relações água/gesso. Para o experimento em questão, adotou uma relação de 1 ml de água/2,5 gramas de gesso.

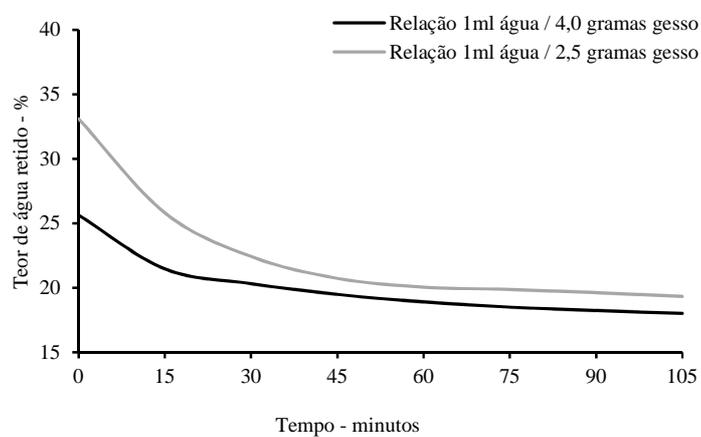


Gráfico 6 Teor de água retido no bloco de gesso para diferentes relações

4.3 Ajuste da equação

4.3.1 Correlação capacitância x tensão de água no gesso

No Gráfico 7 são mostrados as variações dos valores de capacitância, sob as tensões correspondentes.

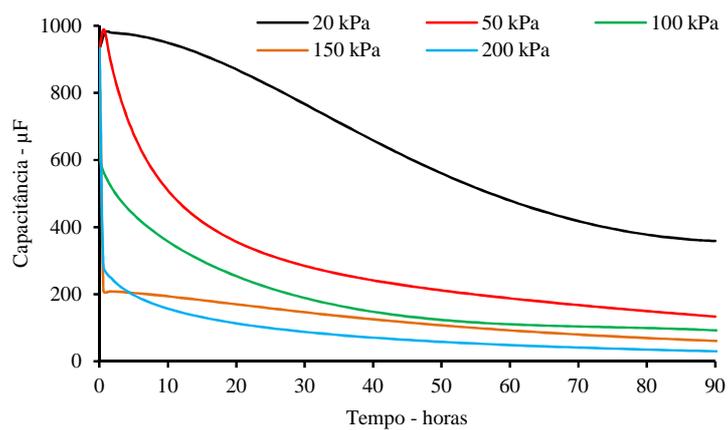


Gráfico 7 Comportamento da capacitância, nas diferentes tensões

Na Tabela 5 encontra-se o registro dos valores da capacitância para o período de 90 horas.

Tabela 5 Valores de capacitância em função da tensão no gesso

Capacitância (μF)	Tensão (kPa)
26	200
64	150
92	100
135,75	50
344,5	20

No Gráfico 8 são mostrados o comportamento da capacitância para as tensões correspondentes.

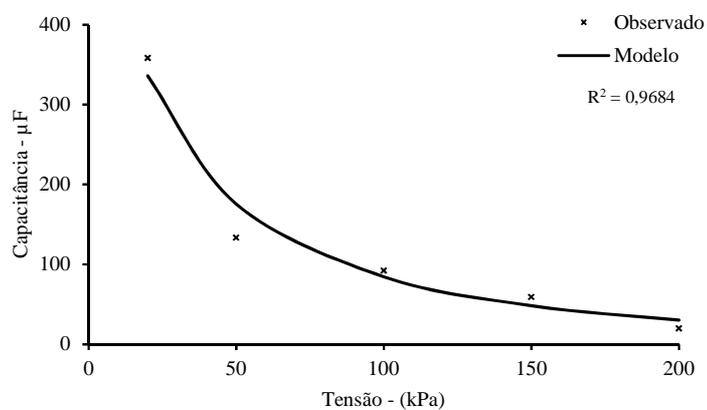


Gráfico 8 Modelo utilizado no manejo da irrigação

Posteriormente, ajustou-se a Equação 7, a qual foi utilizada para o manejo da irrigação. A partir desse modelo, realizou-se o manejo de irrigação dos experimentos 2 e 3.

$$\text{Cap} = e^{(6,9348 - 0,2498 \times T^{0,5})} \quad (7)$$

Em que:

T = tensão, kPa;

Cap = capacitância, μF

A irrigação era iniciada toda vez que a capacitância atingia o valor médio menor que o pré-estabelecido. A Tabela 6 apresenta esses valores para as tensões adotadas no manejo da cultura do feijoeiro.

Tabela 6 Valores de capacitância empregados no manejo da irrigação

Tensão (kPa)	Capacitância (μF)
20	336
40	212
60	149
80	110
120	66

4.3.2 Correlação capacitância x umidade do solo

No Gráfico 9 são mostrados os valores médios de capacitância observados e o modelo, tendo como referência a umidade volumétrica.

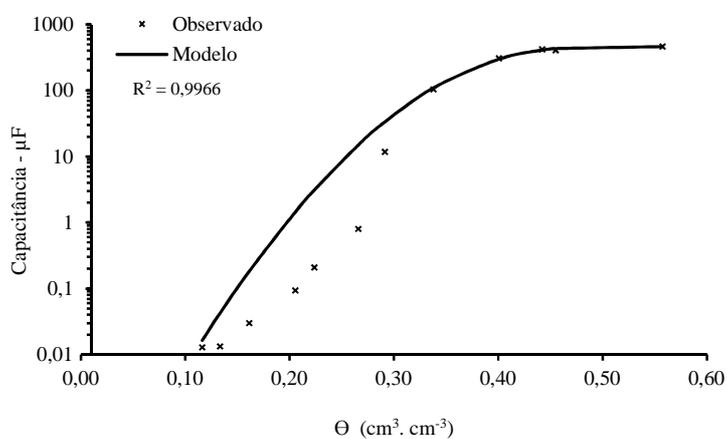


Gráfico 9 Ajuste de regressão capacitância x umidade volumétrica

Na Tabela 7 encontram-se os valores médios de capacitância e de umidade volumétrica utilizados para ajuste do modelo.

Tabela 7 Determinação da capacitância para diferentes umidades do solo

Umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Capacitância (μF)
0,1162	0,01295
0,1335	0,01339
0,1613	0,03006
0,2057	0,09415
0,2238	0,20954
0,266	0,807
0,2915	11,7655
0,3380	104,187
0,4007	307,25
0,4424	423,75
0,4551	410,625
0,5575	465,000

No modelo do Gráfico 9 nota-se uma grande variação entre os valores observados e ajustados para umidades abaixo de $0,30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Umidades do solo abaixo de $0,27 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ não tem interesse prático na irrigação, pois, a tensão nesse valor, aproxima-se do ponto de murcha permanente (1500 kPa). Sendo assim, optou-se em ajustar um modelo para valores de umidades passíveis de serem aplicados no manejo de irrigação. No Gráfico 10 é apresentado o novo ajuste, a partir do qual, foi realizado o manejo da irrigação para o experimento 1.

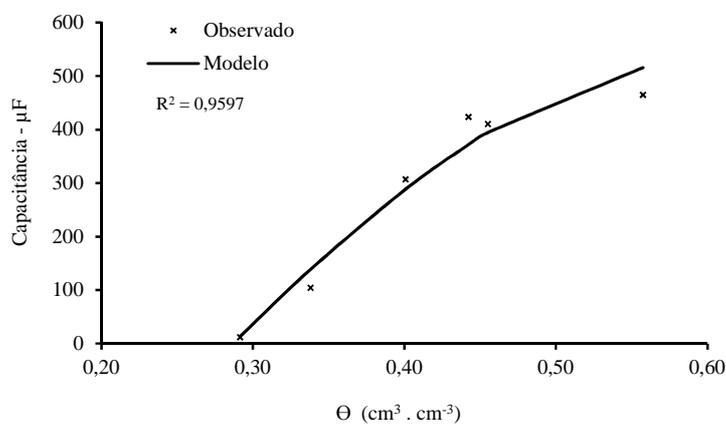


Gráfico 10 Novo modelo ajustado, capacitância x umidade

Através da curva de retenção de água no solo, obteve-se o valor de umidade corresponde as tensões empregadas no experimento 1. A partir da Equação 8 foi calculada a capacitância, sendo esses valores utilizados no manejo de irrigação.

$$\text{Cap} = -672,0781 - 6541,9796 \times \theta^2 \times \ln\theta \quad (8)$$

Em que:

Θ = umidade volumétrica, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

Cap = capacitância, μF

A irrigação era iniciada toda vez que a capacitância atingia o valor médio pré-estabelecido. Na Tabela 8 encontra-se os valores de umidade correspondentes as tensões empregadas no manejo de irrigação, do experimento 1 e a capacitância calculada pela Equação 13, a tensão de 7 kPa equivale à capacidade de campo.

Tabela 8 Valores de capacitância em função da umidade do solo

Tensão (kPa)	θ (cm ³ . cm ⁻³)	Capacitância (μ F)
7	0,514	478
20	0,3862	256
40	0,3335	127
60	0,3139	75
80	0,3035	46
120	0,2926	16

4.4 Métodos de manejo da irrigação

4.4.1 Experimento 1

No Gráfico 11 são mostrados os valores diários de capacitância ao longo do ciclo da cultura para a tensão de 20 kPa. A linha horizontal tracejada representa o valor de capacitância de referência. A irrigação foi realizada toda vez que as leituras médias de capacitância (linha contínua) estavam abaixo da linha de referência. Nota-se que o SA 01, a partir dos 20 DAS, teve um comportamento diferente, sua capacitância não aumentava conforme os outros dois SA, tendo implicações no número de irrigações.

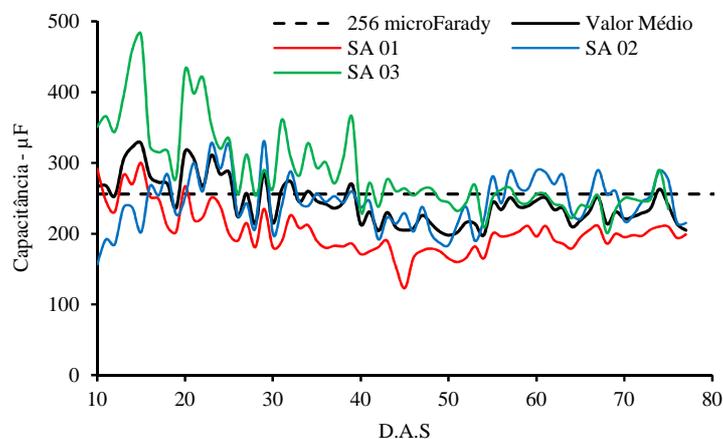


Gráfico 11 Comportamento dos SA, tensão 20 kPa

É importante frisar que, tensões menores (solo mais úmido) apresentaram maior variação nos valores de capacitância, durante o processo de calibração. Provavelmente esse fenômeno decorre da maior mobilidade dos íons presentes na solução do solo ou mesmo dos íons presentes no dielétrico (sulfato de cálcio), pois, a resposta dielétrica de alguns materiais, em frequências abaixo do visível e do ultravioleta, é influenciada pela componente iônica (REZENDE, 1996).

No Gráfico 12 são mostrados os valores diários de capacitância ao longo do ciclo da cultura para a tensão de 40 kPa. A linha horizontal tracejada representa o valor de capacitância de referência. Para esse valor de tensão, observa-se uma menor variação dos valores de capacitância, em relação a tensão de 20 kPa. Vale ressaltar que, independente da tensão, a temperatura exerce forte influência sobre a constante dielétrica, conseqüentemente na capacitância. Estudo realizados por Mohsen-Nia et al. (2010), comprovam o efeito da temperatura sobre alguns fluídos (água, acetona, metanol, butanol). Esses autores observaram que, com o aumento da temperatura de 10 °C para 20 °C, houve redução na constante dielétrica nos fluídos mencionados.

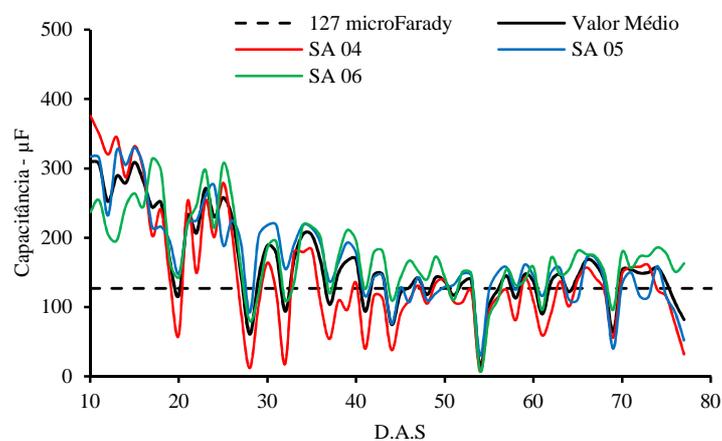


Gráfico 12 Comportamento dos SA, tensão 40 kPa

Similarmente, no Gráfico 13 são mostrados os valores diários de capacitância para tensão de 60 kPa. A linha horizontal tracejada representa o valor de capacitância de referência. Além da influência dos fenômenos físico-químicos nas propriedades dielétrica dos materiais, existe a variação inerente ao processo de fabricação, podendo ter implicações na resposta do SA.

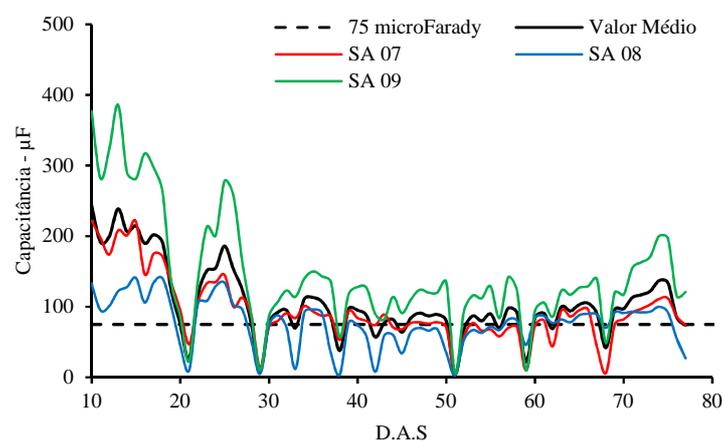


Gráfico 13 Comportamento dos SA, tensão 60 kPa

O Gráfico 14 refere-se às variações da capacitância para a tensão de 80 kPa.

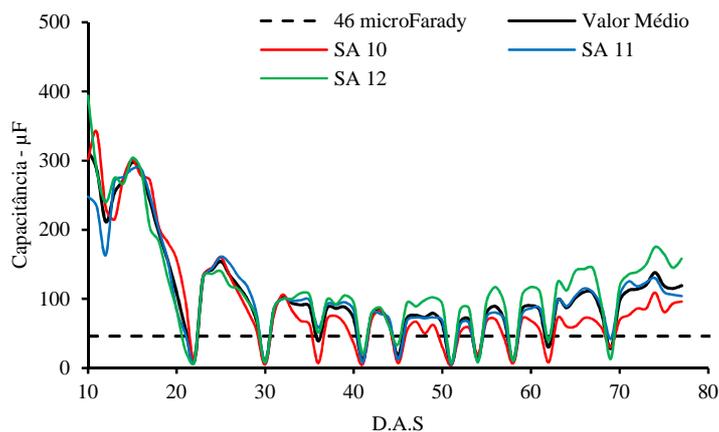


Gráfico 14 Comportamento dos SA, tensão 80 kPa

Seguindo o mesmo raciocínio nota-se que, a capacitância dos três SA foi mais próxima do valor médio, comprovando a premissa de que, quanto maior a tensão menor é a variação da capacitância.

Ao estudar o processo de polarização da água na estrutura porosa do bloco de gesso numa faixa de frequência de 5 Hz a 13 MHz, Rusiniak (2002), concluiu que a variação da capacitância sofre influência dos íons de cálcio. Segundo Conklin (c2005), blocos de gesso usados pra estimar o teor de água no solo, são mais eficientes na faixa de 100 kPa a 1500 kPa. No Gráfico 15 percebe-se menor variação nos valores de capacitância, 120 kPa, quando comparado com a tensão de 20 kPa.

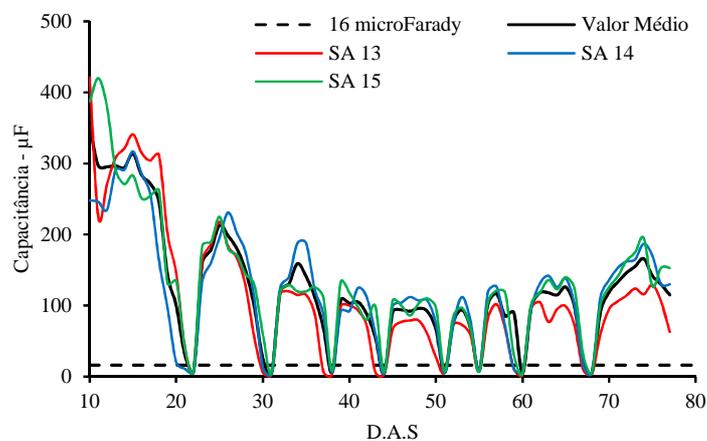


Gráfico 15 Comportamento dos SA, tensão 120 kPa

4.4.2 Experimento 2

Nos Gráficos 16 e 17 são mostrados os valores de capacitância e de tensão, no manejo de irrigação, utilizando SA e TS, respectivamente.

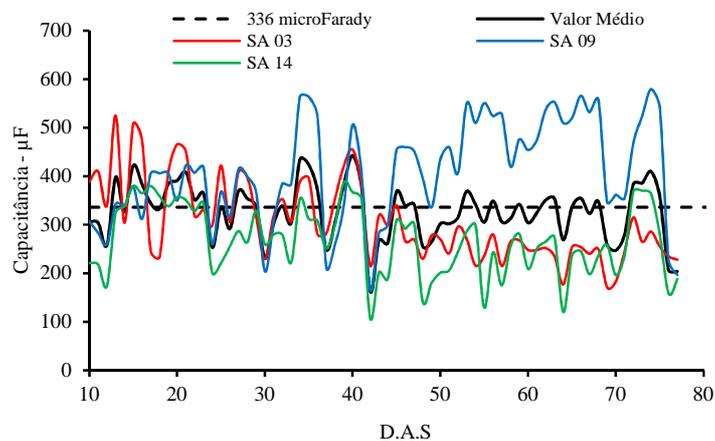


Gráfico 16 Comportamento dos SA, tensão 20 kPa

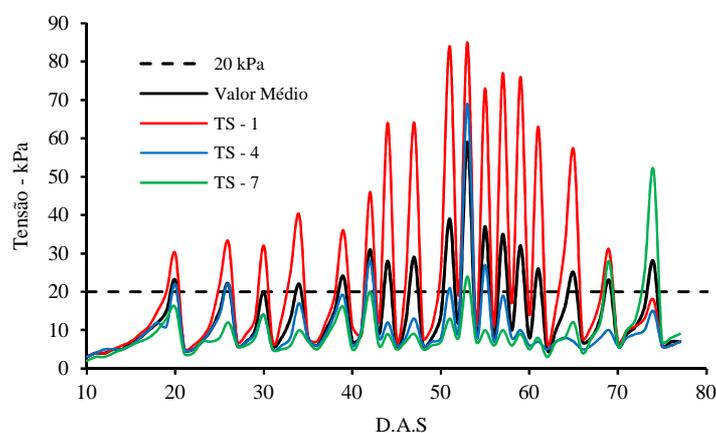


Gráfico 17 Comportamento dos TS, tensão 20 kPa

O manejo de irrigação utilizando os SA, para tensão de 20 kPa, apresentou considerável variação, de maneira similar ao experimento 1. O manejo da irrigação, utilizando os TS, também apresentou variação, tal comportamento pode ser devido à distribuição no tamanho de poros da cápsula cerâmica do TS. O TS 1 apresentou maior variação relativamente, durante boa parte do experimento, embora a partir dos 65 DAS essa variação diminuiu, possivelmente devido a menor demanda de água por parte das plantas. Independente do método empregado no manejo foi observado variação nas medidas.

Nos Gráficos 18 e 19 são mostrados os valores de capacitância e de tensão, respectivamente, no manejo de irrigação para tensão de 40 kPa.

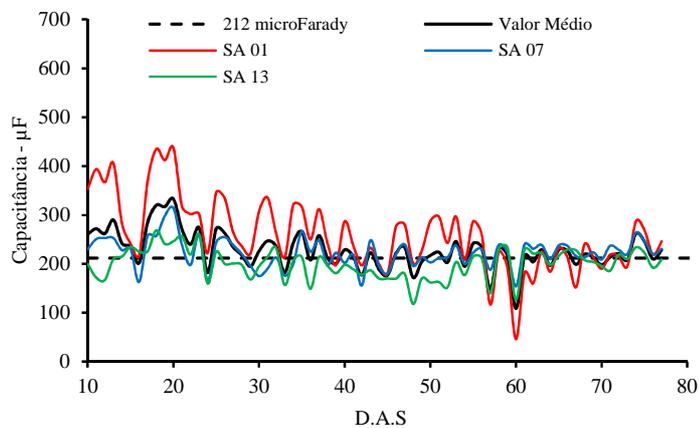


Gráfico 18 Comportamento dos SA, tensão 40 kPa

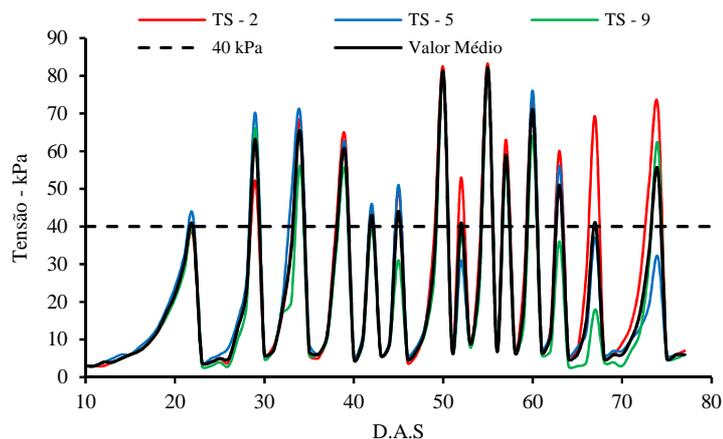


Gráfico 19 Comportamento dos TS, tensão 40 kPa

Nesse tratamento de 40 kPa, verifica-se uma menor variação entre as leituras em ambos os métodos de manejo. O método utilizando SA, seguiu a mesma tendência do experimento 1, ou seja, com a redução do teor de água no solo, menor foi a variação em torno da média.

No Gráfico 20 são mostrados os valores diários de capacitância, para tensão de 60 kPa.

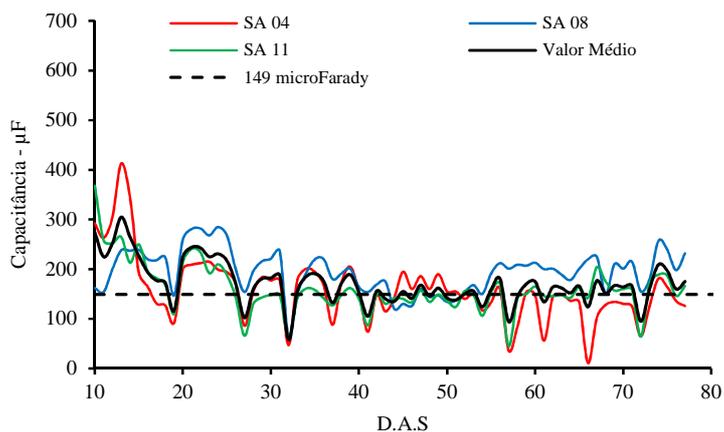


Gráfico 20 Comportamento dos SA, tensão 60 kPa

Observa-se que independente da tensão, o manejo da irrigação utilizando o SA, apresentou maior número de irrigações. No Gráfico 21 são mostrados os valores diários de tensão, para o tratamento de 60 kPa.

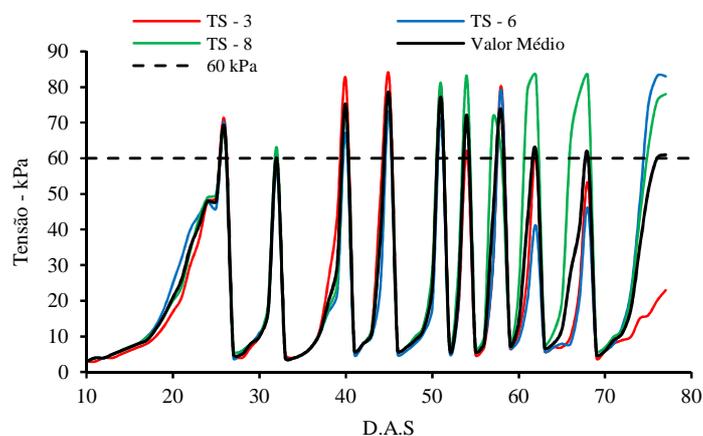


Gráfico 21 Comportamento dos TS, tensão 60 kPa

4.4.3 Experimento 3

Nos Gráficos 22 e 23 são mostrados os valores diários de capacitância e de tensão, no manejo de irrigação, utilizando SA e SMG, respectivamente.

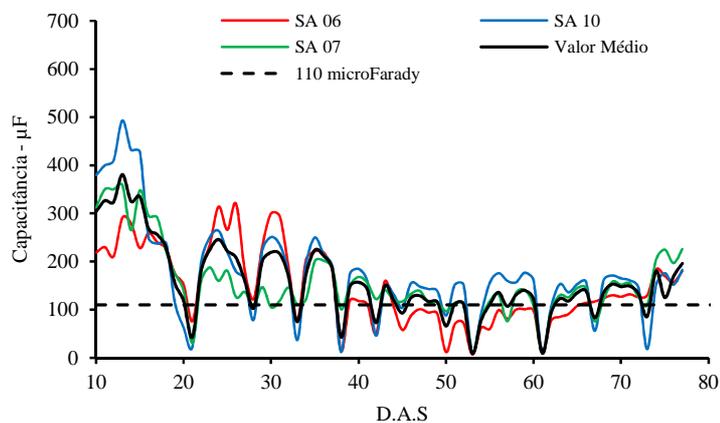


Gráfico 22 Comportamento dos SA, tensão 80 kPa

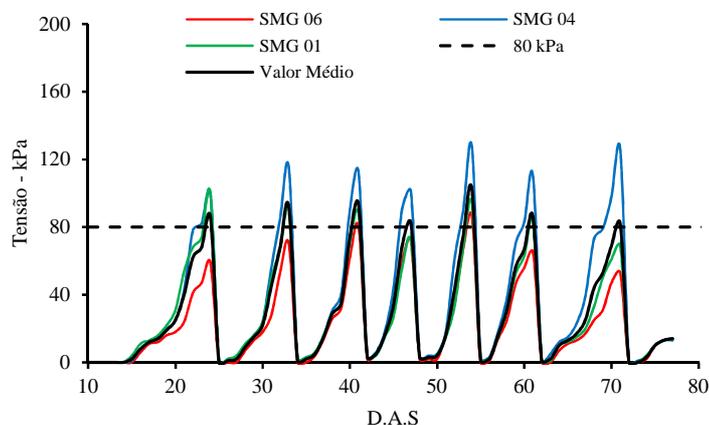


Gráfico 23 Comportamento dos SMG, tensão 80 kPa

Nos Gráficos 24 e 25 são mostrados os valores diários de capacitância e de tensão, respectivamente, para o tratamento de 120 kPa.

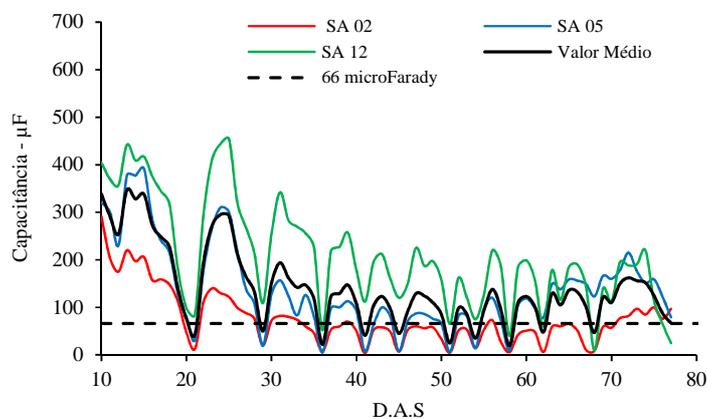


Gráfico 24 Comportamento dos SA, tensão 120 kPa

De acordo com o gráfico 24, houve considerável diferença nas medidas do SA 02 e SA 12. É importante frisar que, independente do método empregado

no manejo da irrigação, essa variabilidade é inevitável, devido ao comportamento dinâmico da água no solo.

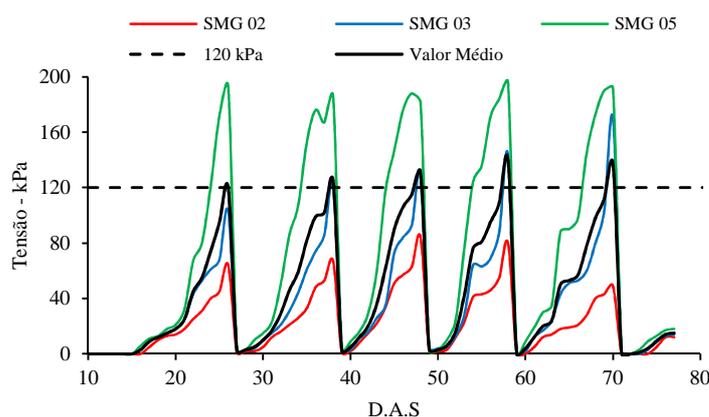


Gráfico 25 Comportamento dos SMG, tensão 120 kPa

De acordo com o gráfico 25, o SMG 05 foi mais susceptível a redução do teor de água no solo. Entretanto, o SMG 02 portou-se de maneira inversa, demonstrando a variabilidade da umidade do solo.

4.5 Avaliação do experimento 1

4.5.1 Número de irrigações e volume de água aplicado

Ao longo do ciclo da cultura foi registrado o número de irrigações e o volume aplicado para as diferentes tensões. No Gráfico 26 é mostrado o número de irrigações registrados nas diferentes tensões.

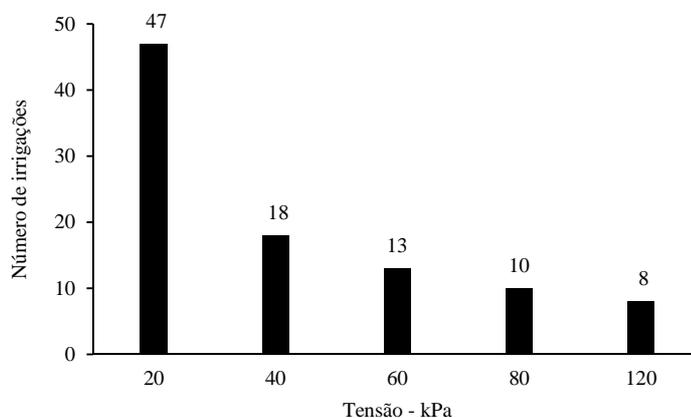


Gráfico 26 Número de irrigações registrado para cada tratamento

O tratamento de 20 kPa recebeu o maior volume de água em relação aos demais tratamentos. No Gráfico 27 é mostrado o volume de água aplicado para os diferentes tratamentos.

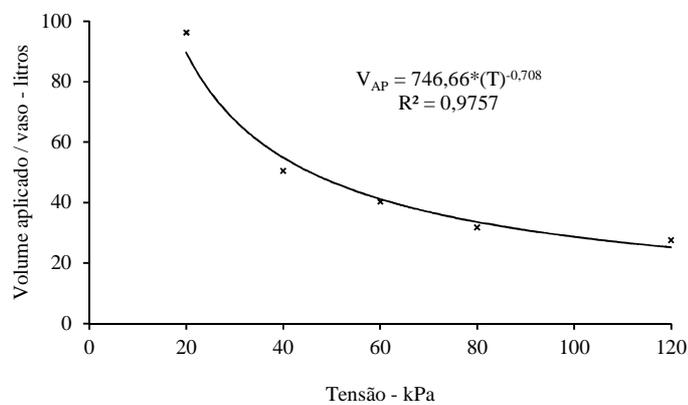


Gráfico 27 Volume de água aplicado para cada tratamento

4.5.2 Resumo das avaliações

Na Tabela 9 é apresentado o resumo dos resultados das análises de variância para os seguintes parâmetros: número de vagens por planta (N_{VP}), número de grãos por planta (N_{GP}), massa de grãos por planta (M_{GP}), massa de 100 grãos (M_{CG}) e, eficiência de uso da água (EUA).

Tabela 9 Resumo das avaliações

FV	GL	Quadrado Médio				
		N_{VP}	N_{GP}	M_{GP} (gramas)	M_{CG} (gramas)	EUA ($mg.L^{-1}$)
Tensão	4	4,75*	123,63*	1,88 ^{ns}	16,44*	376143,79*
Resíduo	20	1,15	29,76	0,84	4,49	6826,83
CV (%)	-	9,14	12,58	9,63	9,52	11,82
Média geral	-	11,73	43,37	9,54	22,26	699,10

*Significativo ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F; ns- não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV: fator de variação; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

No Gráfico 28 é mostrado o comportamento do número de vagens por planta em função da tensão.

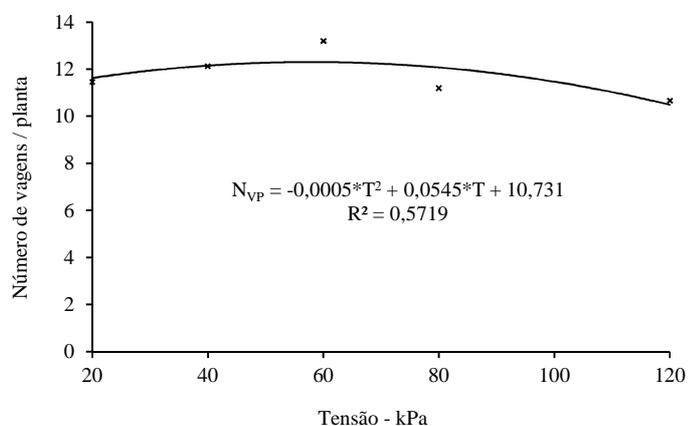


Gráfico 28 Número de vagens por planta em função das diferentes tensões

Observa-se que a maior média ficou entre 40 kPa e 60 kPa, tais valores estão dentro da faixa ideal para a cultura do feijão. A menor média para a tensão de 20 kPa, pode ser explicada pelo maior volume de água aplicado, pois, o feijoeiro é uma planta relativamente sensível ao excesso de água, sendo que o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo bastante prejudicado em tais condições (MONTEIRO, 2009). As tensões de 80 kPa e 120 kPa foram os tratamentos que receberam menor quantidade de água, tendo implicações na produção de vagens. Os dados ajustaram-se melhor ao modelo quadrático, sendo a tensão de 54,5 kPa o ponto ótimo.

No Gráfico 29 é mostrado o comportamento do número médio de grãos por planta (N_{GP}) em função da tensão.

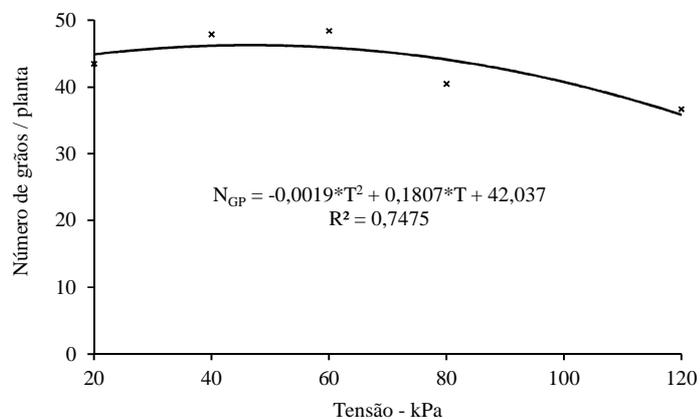


Gráfico 29 Número de grãos por planta em função das diferentes tensões

Apesar dos tratamentos de 40 kPa e 60 kPa ter apresentado maior número do vagens por planta, é importante frisar que, ocorreu maior incidência de vagens chochas. De acordo com a equação ajustada, a tensão ótima para a produção de grãos foi de 47,55 kPa.

A massa de grãos por planta foi a mesma, independente da tensão. Entretanto, vale ressaltar que, as tensões de 80 kPa e 120 kPa tiveram menos grãos do que os demais tratamentos, porém, o tamanho destes compensaram na massa. Nos tratamentos de 20 kPa, 40 kPa e 60 kPa, ocorreu drenagem, principalmente o de menor tensão, o que provavelmente favoreu a lixiviação de nitrogênio. No Gráfico 30 é mostrado o comportamento da massa de 100 grãos (M_{CG}) em função da tensão.

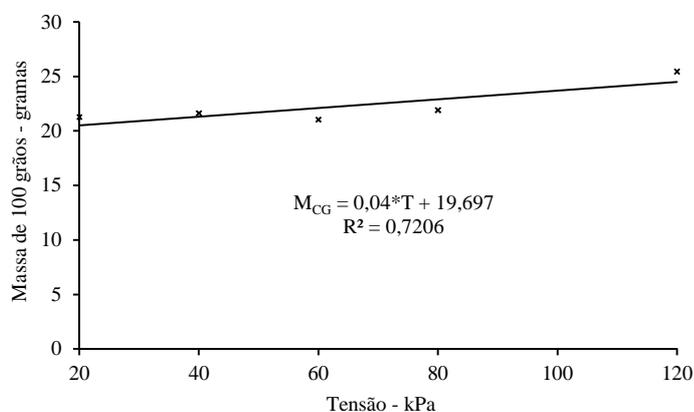


Gráfico 30 Massa de 100 de grãos em função das diferentes tensões

Queiroz (2004), avaliando sistema alternativo de automação da irrigação na cultura do feijoeiro (cultivar BRS Talismã) não encontrou diferença na massa de 100 grãos para faixa de tensão de 15 kPa a 60 kPa. Como mencionado anteriormente, os grãos das baixas tensões foram menores, provavelmente, devido ao excesso de água (lixiviação de nitrogênio). Stone e Moreira (2001), estudando a resposta do feijoeiro sob diferentes lâminas de irrigação e preparo do solo, verificaram que o nitrogênio exerce grande influência na massa de 100 grãos.

A eficiência de uso da água é um parâmetro que assume importância no planejamento da irrigação, pois, auxilia na escolha do método de manejo mais adequado. No Gráfico 31 é mostrado o comportamento da eficiência de uso da água em função da tensão.

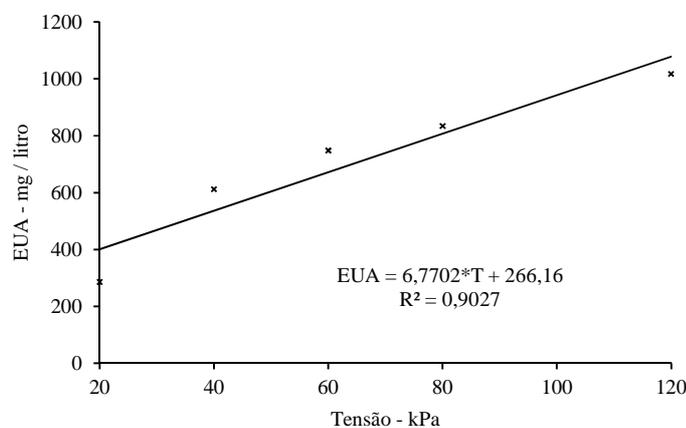


Gráfico 31 Eficiência de uso da água em função das diferentes tensões

Apesar de não haver diferença da massa de grãos por planta nas diferentes tensões, é notório que a tensão de 20 kPa é menos eficiente que os demais tratamentos. De fato, nessa tensão ocorreu maior dispersão dos dados durante o processo de calibração, possivelmente, afetando o volume de água aplicado. Analisando as variáveis supracitadas, verifica-se que o tratamento submetido a tensão de 120 kPa foi o mais adequado.

4.6 Avaliação do experimento 2

4.6.1 Número de irrigações e volume de água aplicado

Neste experimento foram realizadas as mesmas avaliações do experimento 1, porém, para 2 diferentes métodos de manejo de irrigação. Na Tabela 10 é apresentada a análise de variância dos dados referentes ao volume de água aplicado. Observa-se que houve significância, para todas as fontes de variação, no nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 10 Resumo da análise de variância dos dados relativos ao V_{AP}

Fonte de variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio
Método (M)	1	3583,7284*
Tensão (T)	2	63,5973*
Interação (M x T)	2	49,3199*
Resíduo	24	7,61
Média geral		45,297
Coef. Variação		6,09%

*Significativo no nível de 5 % de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 11 são mostrados os valores médios do volume de água aplicado nos diferentes métodos de manejo, em cada tensão.

Tabela 11 Valor médio do V_{AP} (litros) em cada método e tensões

Métodos	Tensão (kPa)		
	20	40	60
SA	58,17 Aa	55,92 Aa	54,58 Aa
TS	33,38 Ab	39,17 Bb	30,56 Ab

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Observa-se que em todas as tensões, o volume de água aplicado foi maior utilizando o SA em relação ao TS. Embora não houve diferença de volume de água aplicada, utilizando o SA, o intervalo entre as irrigações no tratamento de 20 kPa foi menor, ou seja, maior frequência de irrigação, ocorrendo drenagem. No Gráfico 32 são mostrados os volumes de água aplicada nas diferentes tensões, utilizando TS.

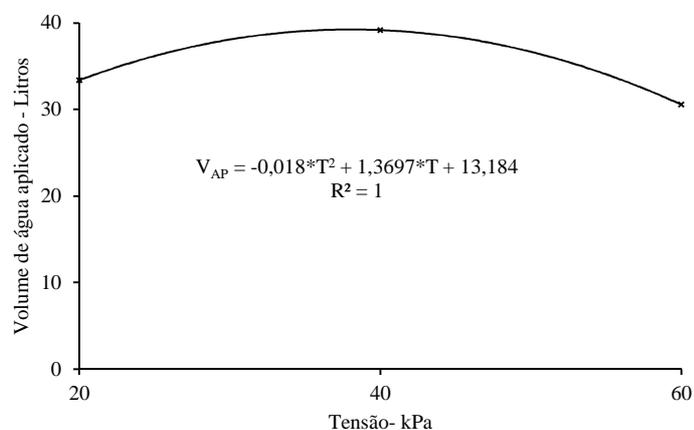


Gráfico 32 Volume de água aplicado em função das tensões, utilizando TS

O tratamento de 40 kPa, utilizando TS no manejo, recebeu maior quantidade de água, em relação aos demais tratamentos. Apesar de não haver diferença estatística do volume de água aplicada, utilizando o TS, entre os tratamentos de 20 kPa e 60 kPa, o intervalo entre as irrigações no tratamento de 20 kPa foi menor, ou seja, maior frequência de irrigação. É importante mencionar que, durante o período experimental, quando ocorreram irrigações consecutivas num intervalo de 48 horas, houve drenagem. Independente do método de manejo.

No Gráfico 33 é mostrado o número de irrigações registradas nas diferentes tensões, utilizando diferentes métodos.

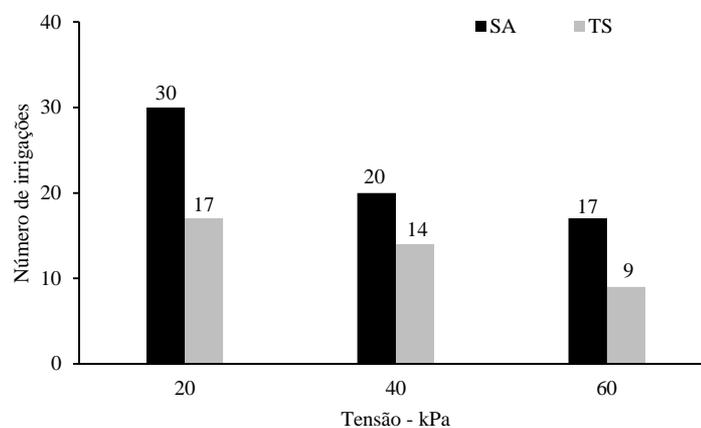


Gráfico 33 Número de irrigações utilizando diferentes métodos

4.6.2 Resumo das avaliações

Na Tabela 12 é apresentado o resumo dos resultados das análises de variância para os seguintes parâmetros: número de vagens por planta (N_{VP}), número de grãos por planta (N_{GP}), massa de grãos por planta (M_{GP}), massa de 100 grãos (M_{CG}) e, eficiência de uso da água (EUA).

Tabela 12 Resumo das avaliações

FV	GL	Quadrado Médio				
		N_{VP}	N_{GP}	M_{GP} (gramas)	M_{CG} (gramas)	EUA ($mg.L^{-1}$)
Método (M)	1	9,64*	107,05*	3,30 ^{ns}	0,43 ^{ns}	421025,79*
Tensão (T)	2	11,93*	22,60*	3,04*	7,22*	279,36 ^{ns}
Interação (M x T)	2	22,14*	61,96*	2,16 ^{ns}	0,08 ^{ns}	22112,34*
Resíduo	24	1,87	18,19	0,83	1,58	4454,81
CV (%)	-	11,91	10,70	10,98	6,06	11,50
Média geral	-	11,50	39,84	8,28	20,79	580,30

*Significativo no nível de 5 % de probabilidade pelo teste F; ns- não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV: fator de variação; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 13 são mostrados os valores médios do número de vagens por planta (N_{VP}), para as diferentes tensões e métodos de manejo de irrigação.

Tabela 13 Valores médios do N_{VP} em função das tensões e métodos

Método	Tensão (kPa)		
	20	40	60
SA	8,87 Aa	11,47 Ba	12,47 Ba
TS	12,13 Ab	13,87 Ab	10,20 Bb

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Observa-se que nas tensões de 20 kPa e 40 kPa, o manejo da irrigação utilizando o SA produziu menos vagens por planta do que o manejo por meio do TS. Provavelmente, esse efeito ocorreu em resposta à lixiviação de nitrogênio. Na tensão de 60 kPa ocorreu o inverso, o manejo utilizando o SA produziu mais vagens. É importante notar que, além da quantidade de água aplicada, deve-se considerar o momento da aplicação, pois, as plantas apresentam diferentes resposta a deficiência ou excesso de água dependendo do estágio vegetativo. Numa condição de excesso de umidade no solo no estágio de floração-frutificação do feijoeiro, foi constatada uma redução na produtividade de 18,6 vezes em relação à umidade na capacidade de campo. Verificou-se também que, em condição de estresse hídrico, a floração e o desenvolvimento das vagens são as fases mais afetadas (ARAÚJO et al., 1996).

Observa-se que no manejo com SA, a tensão de 20 kPa produziu menos vagem. No outro método, a tensão de 60 kPa teve similar comportamento. No Gráfico 34 é mostrado o comportamento do número de vagens por planta nas diferentes tensões, utilizando SA e o TS. De acordo com a equação ajustada, a tensão ótima para a produção de vagens, utilizando o TS, foi de 36,23 kPa.

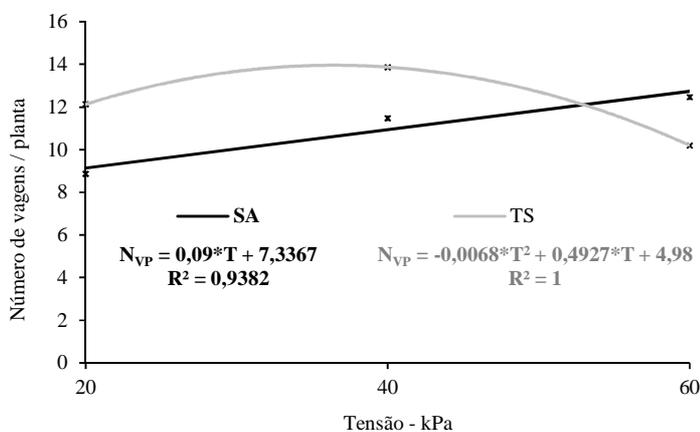


Gráfico 34 Número de vagens por planta, utilizando SA e TS

Na Tabela 14 são mostrados os valores médios do número de grãos por planta, para as diferentes tensões e métodos de manejo de irrigação.

Tabela 14 Valores médios do N_{GP} em função das tensões e métodos

Método	Tensão (kPa)		
	20	40	60
SA	37,87 Aa	43,60 Ba	43,73 Ba
TS	39,26 Aa	39,40 Aa	35,20 Ab

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Observa-se que nas tensões de 20 kPa e 40 kPa, não houve diferença estatística no número de grãos por planta, independente do método empregado. Embora os tratamentos nas tensões de 20 kPa e 40 kPa, utilizando TS, produziram mais vagens, nota-se que nesse método houve maior incidência de vagens chochas. Na tensão de 60 kPa, o número de grãos por planta seguiu o mesmo comportamento de número de vagens, utilizando o SA. Como salientado

anteriormente, o menor interlavo entre as irrigações, nesse método afetou de maneira negativa a produção de vagens e grãos na tensão de 20 kPa. No Gráfico 35 é mostrado o comportamento do número de grãos por planta nas diferentes tensões, utilizando o SA. De acordo com a equação ajustada, a tensão ótima para a produção de grãos foi de 50,41 kPa.

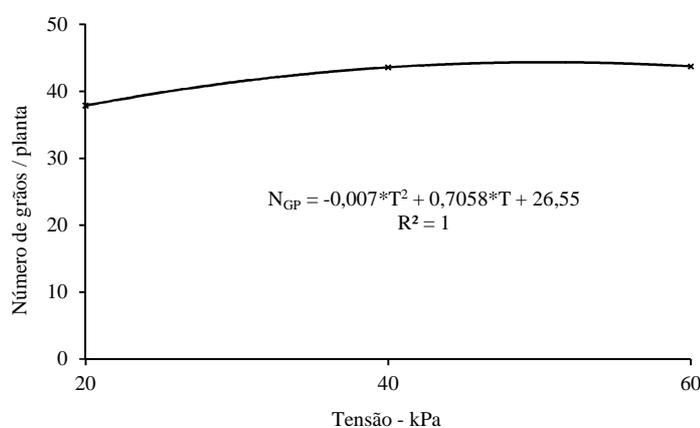


Gráfico 35 Número de grãos por planta, utilizando o SA

De acordo com a Tabela 14, não há diferença significativa no número de grãos por planta entre as tensões, utilizando o TS no manejo da irrigação. Embora o tratamento de 60 kPa tenha produzido menos vagens, seu número de grãos por planta não apresentou diferença significativa em relação aos demais tratamentos, podendo afirmar que suas vagens foram menos chochas.

Os resultados da Tabela 12 mostram que, a massa de grãos por planta e a massa de 100 grãos não foram influenciadas pelos métodos de manejo da irrigação. Entretanto, há influência da tensão. Nos Gráficos 36 e 37 é mostrado o comportamento da massa de grãos por planta e a massa de 100 grãos, respectivamente, nas diferentes tensões. De acordo com a equação ajustada, a tensão ótima para a massa de grãos foi de 38,82 kPa.

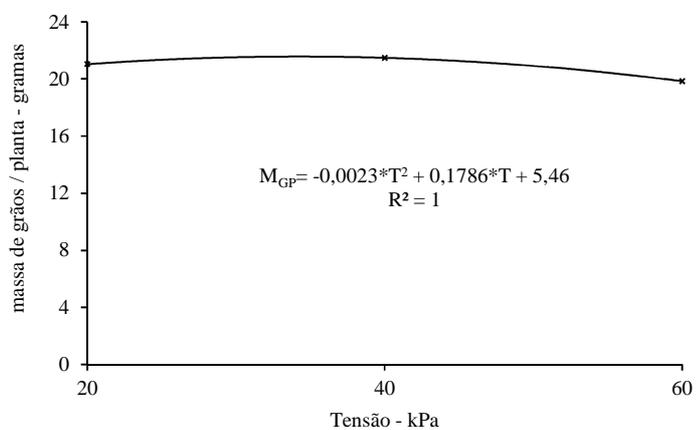


Gráfico 36 Massa de grãos por planta

Os dados Gráfico 37 ajustaram-se melhor ao modelo quadrático, sendo a tensão de 34,23 kPa o ponto ótimo.

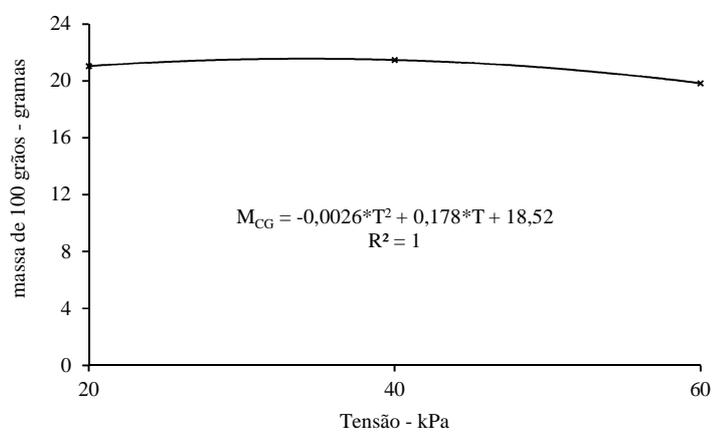


Gráfico 37 Massa de 100 grãos

Os resultados da Tabela 12 mostram que eficiência do uso de água não foi influenciada pelas tensões. Entretanto, o método de manejo da irrigação influencia a EUA.

Na Tabela 15 são mostrados os valores médios da eficiência de uso da água, para as diferentes tensões e métodos de manejo de irrigação.

Tabela 15 Valores médios da EUA (mg.Litro^{-1})

Método	Tensão (kPa)		
	20	40	60
SA	410,26 Aa	496,50 Aa	478,73 Aa
TS	750,74 Ab	653,32 Ab	692,22 Ab

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Os resultados da Tabela 15 evidenciam que para todas as tensões, o manejo utilizando o TS é mais eficiente. De fato, esses resultados são comprovados pelo o maior volume de água aplicado utilizando o SA. Neste experimento nota-se que, independente do método empregado a massa de grãos por planta e o tamanho dos grãos foram maiores, quando submetidos a tensões na faixa de 30 a 40 kPa. Entretanto, comparando-se a EUA para os diferentes métodos, conclui-se que o TS foi o eficiente.

4.7 Avaliação do experimento 3

4.7.1 Número de irrigações e volume da água aplicado

Na Tabela 16 são apresentadas as análises de variância dos dados referentes ao volume de água aplicado (V_{AP}). Observa-se que houve

significância, para todas as fontes de variação, no nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 16 Resumo da análise de variância dos dados relativos ao V_{AP}

Fonte de variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio
Método (M)	1	2360,3126*
Tensão (T)	1	403,2918*
Interação (M x T)	1	64,692*
Resíduo	16	13,379
Média geral		32,025
Coef. Variação		11,42%

*Significativo no nível de 5 % de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 17 é mostrado o volume médio de água aplicado, para as diferentes tensões e métodos de manejo de irrigação.

Tabela 17 Volume médio de água aplicado (Litros.vaso⁻¹)

Métodos	Tensão (kPa)	
	80	120
SA	49,18 Aa	36,60 Ba
SMG	23,85 Ab	18,47 Bb

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott

No Gráfico 38 é mostrado o volume de água aplicado para as tensões de 80 kPa e 120 kPa, utilizando SA e o SMG.

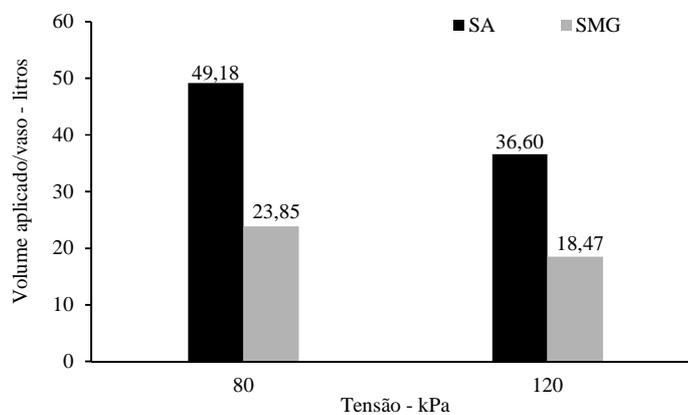


Gráfico 38 Volume de água aplicado, para diferentes tensões e métodos

No Gráfico 39 é mostrado o número de irrigações para as tensões de 80 kPa e 120 kPa, utilizando SA e o SMG.

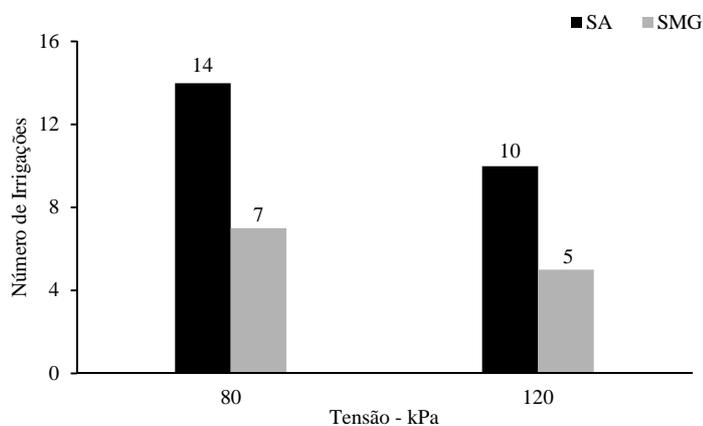


Gráfico 39 Número de irrigações, para diferentes tensões e métodos

Independente da tensão, o número de irrigações foi maior utilizando o SA. Nota-se que os SA registraram as variações de umidade com maior frequência, de maneira similar ao experimento 2.

4.7.2 Resumo das avaliações

Na Tabela 18 é apresentado o resumo dos resultados das análises de variância para os seguintes parâmetros: número de vagens por planta (N_{VP}), número de grãos por planta (N_{GP}), massa de grãos por planta (M_{GP}), massa de 100 grãos (M_{CG}) e, eficiência de uso da água (EUA).

Tabela 18 Resumo das avaliações

FV	GL	Quadrado Médio				
		N_{VP}	N_{GP}	M_{GP} (gramas)	M_{CG} (gramas)	EUA ($mg.L^{-1}$)
Método (M)	1	158,71*	2233,02*	73,65*	28,49*	11086,87 ^{ns}
Tensão (T)	1	15,63*	121,67*	2,90*	9,07 ^{ns}	14813,67 ^{ns}
Interação (M x T)	1	4,07 ^{ns}	131,74*	5,60*	3,35 ^{ns}	105529,94*
Resíduo	16	1,58	13,00	0,40	2,15	4636,76
CV (%)	-	13,76	11,48	9,51	6,80	10,74
Média geral	-	9,15	31,39	6,60	21,58	633,93

*Significativo ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F; ns- não significativo pelo teste F aos 5% de probabilidade; FV: fator de variação; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

Na Tabela 19 são mostrados os valores médios do N_{VP} para os diferentes métodos de manejo de irrigação.

Tabela 19 Número médio de vagens para diferentes métodos

Métodos	N_{VP}
SA	11,97 a
SMG	6,33 b

As médias seguidas com mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

De acordo com os resultados da Tabela 19 pode-se afirmar que independente da tensão, o método que empregou o SA no manejo da irrigação teve um número médio de vagens por planta maior. Na Tabela 20 são mostrados os valores médios do N_{VP} para os diferentes valores de tensão.

Tabela 20 Número médio de vagens para tensões

Tensão (kPa)	N_{VP}
80	10,03 a
120	8,27 b

As médias seguidas com mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott

De acordo com os resultados da Tabela 20 pode-se afirmar que independente do método, a tensão de 80 kPa teve um número médio de vagens por planta maior. Na Tabela 21 são mostrados os N_{GP} , para as diferentes tensões e métodos de manejo de irrigação.

Tabela 21 Valores médios do N_{GP} , para diferentes tensões e métodos

Métodos	Tensão (kPa)	
	80	120
SA	41,87 Aa	42,07 Aa
SMG	25,87 Ab	15,80 Bb

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Os resultados da Tabela 21 evidenciam que, independente da tensão o número médio de grãos por planta foi maior utilizando o SA e que o tratamento

submetido à tensão de 80 kPa, empregando o SMG no manejo, produziu mais grãos por planta do que o de 120 kPa.

Na Tabela 22 são mostrados os números médios M_{GP} , para as diferentes tensões e métodos de manejo de irrigação.

Tabela 22 Valores médios da M_{GP} , para diferentes tensões e métodos

Métodos	Tensão (kPa)	
	80	120
SA	8,37 Aa	8,67 Aa
SMG	5,59 Ab	3,77 Bb

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Os resultados da Tabela 22 mostram que, independente da tensão a massa média de grãos por planta foi maior utilizando o SA. Evidencia-se também que, a M_{GP} foi menor no tratamento submetido à tensão de 120 kPa, utilizando o SMG no manejo da irrigação.

Os resultados da Tabela 18 mostram que a tensão não influenciou a M_{CG} . Entretanto, nota-se que o método de manejo foi significativo, podendo afirmar que independente da tensão, existe um método que produziu grãos maiores. Na Tabela 23 são mostrados os valores médios da M_{CG} para os diferentes métodos.

Tabela 23 Massa média de 100 grãos para diferentes métodos

Métodos	M_{CG}
SA	20,39 a
SMG	22,78 b

As médias seguidas com mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Diante dos resultados da Tabela 23, pode-se afirmar que no método de manejo da irrigação, utilizando SMG, os grãos foram maiores.

Os resultados da Tabela 18 mostram também que, a tensão e o método não influenciaram de forma significativa a EUA. Entretanto, a escolha do método mais eficiente depende da tensão, e vice-versa, a escolha da tensão mais eficiente depende do método. Na tabela 24 são mostrados os valores médios da EUA para os diferentes métodos e tensões.

Tabela 24 EUA média (mg.Litro^{-1}), para diferentes tensões e métodos

Métodos	Tensão (kPa)	
	80	120
SA	510,54 Aa	710,25 Ba
SMG	702,90 Ab	612,06 Ab

As médias seguidas com a mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem estatisticamente entre si no nível de 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

De acordo com os resultados da Tabela 24, a utilização do SMG permitiu maior EUA, para tensão de 80 kPa. No tratamento submetido a 120 kPa, ocorreu o inverso, ou seja, a EUA foi maior utilizando o SA, em consequência da maior produtividade de M_{GP} .

4.8 Avaliação dos sensores alternativos

Após o término dos experimentos, os SA foram retirados dos vasos a fim verificar o estado físico do bloco de gesso, alterações nos eletrodos, contato físico entre solo-dispositivo. As Figuras 12a e 12b ilustram a interação dos SA com o solo.

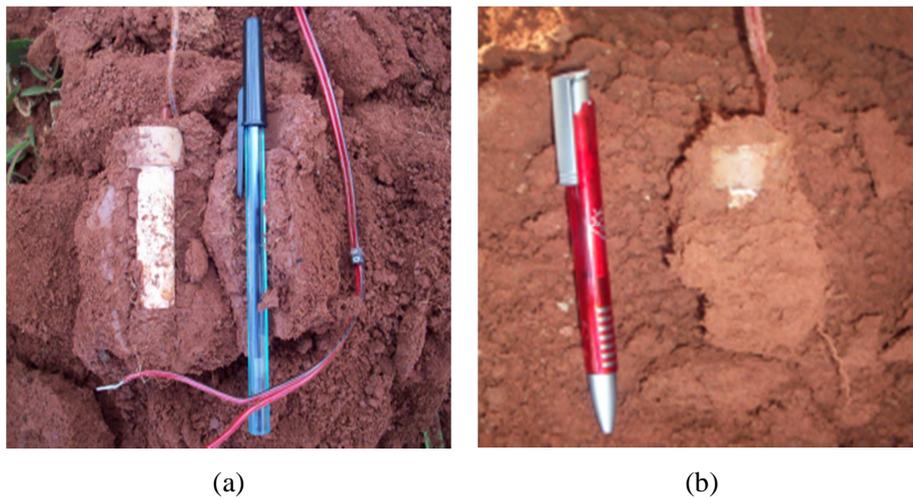


Figura 12 Contato SA-Solo

Os SA tiveram contato satisfatório com a matriz do solo, em volta do mesmo formou-se uma estrutura coesa. Observaram-se indícios na parte externa do bloco de gesso, de dissolução favorecido pela presença de algumas radicelas. É importante salientar outro efeito indesejado, atribuído ao tipo de sinal aplicado aos SA. Refere-se ao fenômeno de eletrólise ocorrido em alguns SA, principalmente, aqueles submetidos a menor tensão (solo mais úmido). Tal fenômeno foi comprovado pelo desgaste dos eletrodos e formação de sulfato de cobre. A Figura 13a ilustra maior intensidade do fenômeno de eletrólise nos capacitores submetidos à tensão de 20 kPa. A Figura 13b ilustra os SA submetidos à tensão de 120 kPa, observa-se que o fenômeno de eletrólise foi menos expressivo.

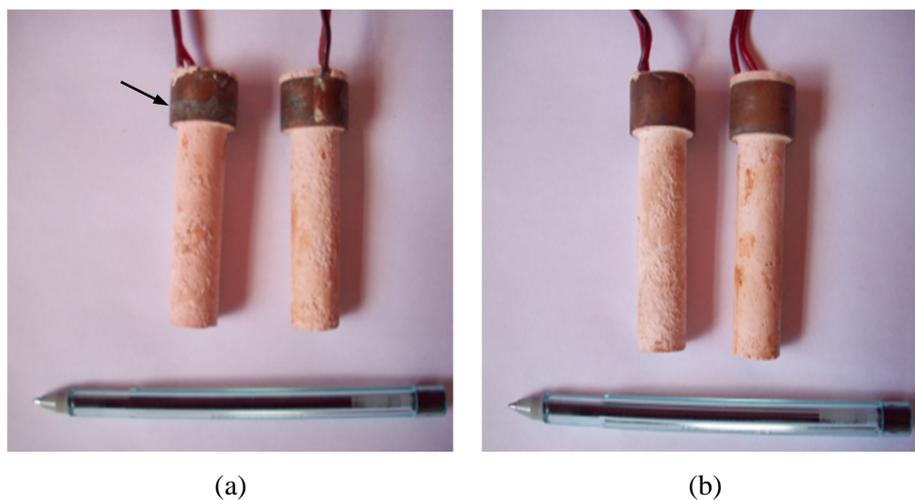


Figura 13 Fenômeno de eletrólise

Durante o manejo da irrigação, os SA foram submetidos a um tempo de carga de um minuto. Esse tempo foi adotado como sendo necessário para estimar a umidade do solo. Entretanto, constatou-se que esse tempo foi inadequado para baixas tensões, pois, nessa condição os SA necessitariam de um tempo de carga maior. Para altas tensões os SA eram carregados mais rápidos, devido menor teor de água no solo. Assim, pode-se afirmar que o teor de água no solo, para baixas tensões, foi subestimado tendo implicações no número de irrigações, conseqüentemente, no volume de água aplicado, principalmente nos tratamentos submetidos a 20 kPa. Em relação aos métodos de calibração, observa-se que para um mesmo valor de tensão, os valores de capacitância utilizando sistema pressurizado foram maiores (Tabela 6) do que os valores calibrados pela a interação com solo (Tabela 8). Essa diferença nos valores de capacitância se deve a interação da argila com as moléculas de água. Ishida et al. (2000 apud BENEDETTO, 2010), salientam a influência dos minerais de argila (caulinita, alofana, montmorillonita, imogolita) na inércia dos dipolos da água.

Dessa maneira, recomenda-se calibrar os dispositivos através de sua instalação no solo, devido à relevância desses minerais.

4.9 Custo dos sensores alternativos

Na Tabela 25 são mostrados os preços dos materiais utilizados na construção dos SA.

Tabela 25 Custo dos materiais

Materiais	Preço (R\$)	Unidade	Custo unitário (R\$)
Fio paralelo 1 mm ²	0,90	metro	0,45
Tubo de cobre Φ 15 mm	10,48	metro	0,126
Tubo de cobre Φ 22 mm	17,82	metro	0,214
Tubo de PVC 3/4"	2,02	metro	0,03
Gesso tipo IV	14,00	Kilograma	0,56
Total	45,22		1,38

Os preços dos materiais da Tabela 25 foram obtidos no comércio local no dia 16/12/2010. O custo unitário do SA, desconsiderando o valor da mão-de-obra e energia elétrica, foi de R\$ 1,38. Para efeito de comparação, o custo médio do TS e SMG foi de R\$ 30,00 e R\$ 150,00 respectivamente. O custo médio dos instrumentos utilizados no manejo da irrigação foi: R\$ 90,00 (capacímetro digital), R\$1.000,00 (tensímetro de punção) e R\$ 1.200,00 (leitor digital Watermark®).

5 CONCLUSÕES

- a) Os capacitores avaliados são mais susceptíveis as variações de umidade do solo em relação aos tensiômetros e SMG;
- b) O tipo sinal aplicado pelo capacímetro não é adequado, pois, propiciou o fenômeno de eletrólise nos eletrodos de cobre;
- c) O tempo de carga nos capacitores, para os tratamentos de menor tensão, foi insuficiente, pois, a umidade foi subestimada;
- d) O método de calibração, utilizando sistema pressurizado (compressor), não é recomendado, pois, o mesmo não considera a influência dos minerais de argila nas moléculas de água;
- e) Os valores de capacitância tiveram maior variação em baixas tensões, necessitando de um estudo de normalidade dos dados;
- f) Realizados os ajustes relativos aos fatores supracitados, o dispositivo desenvolvido, demonstra potencial para ser utilizado, principalmente pelo seu baixo custo.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, A. B. C. A method of determining soil-moisture content based on the variation of the electrical capacitance of soil, at a low frequency, with moisture content. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, n. 1, p. 29-41, 1943.

ANDERSON, A. B. C.; EDLEFSEN, N. E. The electrical capacity of the 2-electrode plaster of paris block as an indicator of soil-moisture content. **Soil Science**, Baltimore, v. 54, n. 1, p. 35-46, 1942.

ARAÚJO, R. S. et al. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 786 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PNBR 12:02.08-022**: requisitos mínimos para elaboração de projeto de sistema de irrigação localizada. São Paulo, 1986. 18 p.

ÁVILA, L. F. **Comportamento espacial e temporal da umidade do solo numa bacia hidrográfica na Serra da Mantiqueira, Minas Gerais**. 2008. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

BENEDETTO, A. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 26-35, May 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2009. 204 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normas climatológicas: 1961 – 1990**. Brasília: EMBRAPA/DNMET, 1992. 84 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Intercâmbio comercial do agronegócio**: principais mercados de destino. Brasília: MAPA/ACS, 2010. 443 p.

CAMPBELL, G. S. **Determining the -15 Bar (Permanent Wilt) water content of soils with the WP4C**. 2010. Disponível em: <<http://www.decagon.com/products/instruments/water-potential-instruments>>. Acesso em: 8 dez. 2010.

CHANG, Z. Y. et al. Extending the limits of a capacitive soil-water-content measurement. **Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 56, n. 6, p. 2240-2244, Dec. 2007.

CHRISTOFIDIS, D.; FERREIRA, R. S. A.; LIMA, J. E. F. W. **O uso da irrigação no Brasil**. 2004. Disponível em: <<http://cf.org.br/cf2004/irrigação.doc>>. Acesso em: 18 set. 2010.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. de; LEGUIZAMON, R. C. A. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 5, p. 789-798, 2003.

CONKLIN, R. A. **Introduction to soil chemistry**: analysis and instrumentation. Hoboken: Wiley – Interscience, c2005. 218 p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, 2004.

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

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. **Anais...** São Carlos: Sociedade Internacional de Biometria, 2000. p. 255-258.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS IN THE AMERICAS. **Es necesario mejorar las prácticas agrícolas**. 2007. Disponível em: <http://www.fao.org.br/vernoticias.asp?id_noticia=46>. Acesso em: 19 out. 2007.

FRANGI, J. P. et al. New in situ techniques for the estimation of the dielectric properties and moisture content of soils. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 341, n. 10/11, p. 831-845, Oct./Nov. 2009.

FREITAS, W. A. et al. Avaliação de dispositivo, de baixo custo, para determinação de potencial matricial e umidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Petrolina. **Anais...** Petrolina: CONBEA, 2009. 1 CD-ROM.

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

GONTIJO, I. **Variabilidade espacial do comportamento compressivo de dois latossolos sob diferentes usos**. 2007. 120 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001. 3 v.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Amsterdam: Elsevier Academic, c2004. 494 p.

ITABORAHY, C. R. et al. **Agricultura irrigada e o uso racional da água**. Brasília: Agência Nacional de Águas – Superintendência de Conservação de Água e Solo, 2004. 30 p.

JESUS JUNIOR, W. C. de et al. **Novas tecnologias em ciências agrárias**. Alegre: UFES, 2007. 264 p.

KIZITO, F. et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 352, n. 3/4, p. 367-378, May 2008.

KUMHALA, F. et al. Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. **Biosystems Engineering**, London, v. 102, n. 1, p. 36-43, Jan. 2009.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2007. 358 p.

MOHSEN-NIA, M. et al. Dielectric constants of water, methanol, ethanol, butanol and acetone: measurement and computational study. **Journal of Solution Chemistry**, New York, v. 39, n. 5, p. 701-708, May 2010.

MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. 530 p.

OLIVEIRA, A. D. S. de. **Avaliação do sensor de umidade TOPDEA no manejo da irrigação**. 2008. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

PAULA JÚNIOR, T. J. de et al. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na região central-brasileira: 2007-2009**. Viçosa, MG: EPAMIG, 2008. 180 p.

PERSSON, M. et al. A small-scale matric potential sensor based on time domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 533-536, 2006.

PLATER, C. V. de. A portable capacitance: type soil moisture meter. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 80, n. 5, p. 391-396, 1955.

QUEIROZ, T. M. de. **Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2004. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

REZENDE, S. M. **A física de materiais e dispositivos eletrônicos**. Recife: Universitária da UFPE, 1996. 530 p.

ROQUE, W. **Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para a medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo**. 2008. 45 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

RUSINIAK, L. Spontaneous polarization of water in porous structure of a solid body. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 148, n. 2, p. 313-319, 2002.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 495 p.

SHOCK, C. C. **Instrumentos para determinação da umidade do solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, 1998. p. 137-150.

SILVA, V. da; MELLO, N. T. C. de (Org.). **Agronegócio**: desenvolvimento, meio ambiente e sociedade: ciclo de debates IEA 65 anos. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 2009. 225 p.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 473-481, mar. 2001.

VLACK, L. H. van. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. São Paulo: E. Blücher; 1973. 318 p.

WILSON, J. S. **Sensor technology handbook**. Amsterdam: Elsevier, 2005. 691 p.