



WELLINGTON ALVES DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
DISPOSITIVO CAPACITIVO PARA MANEJO
DE IRRIGAÇÃO**

LAVRAS - MG

2014

WELLINGTON ALVES DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
CAPACITIVO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Irrigação, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Freitas, Wellington Alves de.

Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo capacitivo para
manejo de irrigação / Wellington Alves de Freitas. – Lavras : UFLA,
2014.

210 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.

Bibliografia.

1. Sinais elétricos. 2. Capacitância. 3. Manejo da irrigação. 4.
Biofilme. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 621.315

WELLINGTON ALVES DE FREITAS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
CAPACITIVO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Irrigação, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de março de 2014.

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Dr. Alberto Colombo | UFLA |
| Dra. Fátima Conceição Rezende | UFLA |
| Dr. Jarbas Honório de Miranda | USP - ESALQ |
| Dr. Mozart Martins Ferreira | UFLA |

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho
Orientador

LAVRAS - MG

2014

AGRADECIMENTOS

Ao Soberano Deus, pela oportunidade de contemplar sua obra e 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 graduandos, Ewerton Ferreira Dilelis e Maria Eduarda Guarrido Viana, pela ajuda concedida nos experimentos de campo.

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.

À CAPES, pela bolsa concedida.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO GERAL

A necessidade de prover alimentos à população, em quantidade e qualidade compatíveis, com a crescente demanda, vem exercendo forte pressão sobre os recursos naturais, dentre os quais, o solo e a água merecem destaque. Considerado como um dos líderes nas exportações agrícolas, o Brasil desperta a atenção da comunidade internacional quando o assunto refere-se ao uso sustentável dos recursos hídricos. A agricultura irrigada, é a principal usuária e, tem sido alvo de críticas quanto ao desperdício e falta de manejo da água nos sistemas de irrigação. Tal situação é agravada tanto pela falta de informação de alguns produtores rurais, quanto pelo custo dos instrumentos e sensores destinados ao manejo. Assim, a proposta deste trabalho visa desenvolver e avaliar um Dispositivo Capacitivo (DC) capaz de estimar a umidade do solo para fins de manejo de irrigação. Estruturalmente, o trabalho foi desenvolvido em quatro etapas e apresentado em quatro capítulos. No Capítulo um foi desenvolvido o DC, sendo esse um capacitor de forma cilíndrica com eletrodos de cobre, nos quais foram aplicados sinais elétricos. Utilizou-se microscópio eletrônico de varredura, para determinara microestrutura e os elementos químicos constituintes no material dielétrico. Os valores de tensão elétrica de saída foram relacionados com as umidades gravimétricas correspondentes por meio do circuito RC (Resistor-Capacitor). Tal procedimento foi realizado utilizando-se dois diferentes solos: Latossolo Vermelho Distroférrico e Latossolo Vermelho Amarelo. No Capítulo dois os DC foram comparados aos Tensiômetros (TS) no manejo da irrigação durante o cultivo de alface romana, a qual foi submetida a baixas tensões de água no solo. O Capítulo três teve por objetivo analisar o comportamento dos DC em comparação com os Sensores de Matriz Granular (SMG) ao longo do ciclo vegetativo do milho. O Capítulo quatro foi estruturado de maneira que descrevesse o comportamento dos DC, utilizando o leitor Watermark[®]. Para tal experimento, foram cultivadas plantas de trigo. Nos três últimos capítulos, foram avaliados: a variação das tensões de água no solo ao longo do ciclo das culturas vegetais, para todos os dispositivos; estimativa do volume de água aplicado; número de irrigações; produtividade de grãos (trigo e milho); massa fresca comercial; teor de clorofila total (alface) e eficiência de uso da água. Diante dos resultados, nota-se que o DC apresenta bom potencial para o manejo de irrigação, entretanto, recomenda-se analisar a viabilidade do reuso de ambos os sensores eletrométricos, pois, ao longo do tempo, pode ocorrer na superfície metálica dos eletrodos, corrosão em decorrência de atividade microbiológica afetando as leituras de tensão de água no solo de maneira acentuada.

Palavras chave: Umidade do solo. Capacitância. Circuito RC. Biocorrosão.

GENERAL ABSTRACT

The need to provide food for the population in quantity and quality compatible with the growing demand, has been exerting strong pressure on natural resources, among which soil and water are noteworthy. Considered as one of the leaders in agricultural exports, Brazil arouses the attention of the international community when it refers to the sustainable use of water resources. Irrigated agriculture is the major user in this area, and has been the target of criticism regarding the waste and the lack of water management in irrigation systems. This situation is exacerbated both by the lack of information from some farmers, as well as the cost of instruments and sensors for its management. The proposal of this work is to develop and evaluate a Capacitive Device (CD) capable of estimating soil moisture for irrigation scheduling purposes. Structurally, the work was developed in four stages and presented in four chapters. In chapter one the CD was developed, as a cylindrical capacitor with copper electrodes in which electrical signals were applied. We used scanning electron microscopy to determine the microstructure and the constituent elements of the dielectric material. The values of voltage output were related to the corresponding gravimetric moisture through the RC (Resistor-Capacitor) circuit. This procedure was performed using two different soils: dark red oxisol and yellowish oxisol. In Chapter two the CD was compared to Tensiometers (TS) in the management of irrigation during the growing of the romaine lettuce, which was subjected to low soil water tension. Chapter three analyzed the behavior of the CD compared to the Granular Matrix Sensors (GMS) throughout the growing cycle of corn. Chapter four was structured in a way to describe the behavior of the CD, using the Watermark[®] reader. For this experiment, wheat plants were grown. In the last three chapters, the following were evaluated: the variation of the soil water tensions alongside the cycle of the crops (for all devices); the estimate of the quantity of water applied; the number of irrigations; the grain yield (wheat and corn); the commercial fresh mass; the total chlorophyll content (lettuce) and the efficiency of water use. Given these results, it is noted that the CD has good potential for irrigation management, however, it is recommended to analyze the feasibility of reusing both electrometric sensors, since over time, corrosion due to microbial activity affecting the readings of soil water tension can occur sharply on the metal surface of the electrodes.

Keywords: Soil moisture. Capacitance. RC circuit. Biocorrosion.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Matriz energética brasileira, ano 2010 | 25 |
| Figura 2 | Participação na produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação | 26 |
| Figura 3 | Demandas consuntivas dos recursos hídricos no Brasil em 2010..... | 29 |
| Figura 4 | Evolução da área irrigada no Brasil | 30 |
| Figura 5 | Agricultura irrigada no mundo e no Brasil..... | 30 |
| Figura 6 | Área irrigada nas diferentes regiões administrativas brasileiras | 31 |
| Figura 7 | Áreas afetadas pela salinidade no distrito irrigado de Sinaloa, México..... | 32 |
| Figura 8 | Sonda de nêutrons instalada em uma bacia de calibração (a) e área cultivada com pimentão (b) | 38 |
| Figura 9 | Esquema de instalação da sonda e pontos de medição..... | 40 |
| Figura 10 | Sensor de matriz granular Watermark® | 41 |
| Figura 11 | Unidade de comunicação inteligente com SMG e dois termopares instalados em campo: plantio do algodão (a) e com cultivo de amendoim (b) | 41 |
| Figura 12 | Molécula de água | 42 |
| Figura 13 | Representação esquemática da distribuição desordenada das moléculas dipolares de água (a) e após a polarização (b) num material dielétrico..... | 43 |
| Figura 14 | Variação da constante dielétrica em função da frequência de um campo elétrico alternado | 44 |
| Figura 15 | Polarização eletrônica | 45 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 16 | Polarização iônica | 45 |
| Figura 17 | Dipolos elétricos permanentes (setas) | 46 |
| Figura 18 | Perda dielétrica em função da frequência do sinal aplicado..... | 47 |
| Figura 19 | Efeito pelicular: a baixas frequências (a) a corrente passa por toda a seção transversal de um fio condutor, e a altas frequências (b) passa apenas por uma camada de espessura e | 48 |
| Figura 20 | Microscópio eletrônico de varredura (a), Instrumento de EDS (b) | 49 |
| Figura 21 | Material dielétrico e formas: gesso em pó (a), mistura gesso e água (b) e formas de alumínio (c) | 50 |
| Figura 22 | Materiais utilizados na construção do DC: tubos de cobre (a), tubos de PVC (b), solda a base de estanho (c), cabo PP 0,75 mm ² (d), ferro de solda (e), paquímetro digital (f)..... | 51 |
| Figura 23 | Etapas da construção do DC: corte do tubo de cobre (a), inserção do eletrodo externo (b), soldagem de fio no eletrodo externo (c), preenchimento das formas (d), inserção do eletrodo interno (e), período de secagem (f), soldagem de cabo PP - eletrodo interno (g), capacitores cilíndricos (h)..... | 52 |
| Figura 24 | Dimensões (fora de escala) adotadas na construção do DC | 53 |
| Figura 25 | Gerador de sinais utilizado neste experimento..... | 54 |
| Figura 26 | Osciloscópio digital utilizado neste experimento..... | 54 |
| Figura 27 | Dispositivos capacitivos sendo inserido na amostra de solo saturado para calibração, em que (a) e (b) refere-se ao LVd e (c) LVA | 60 |
| Figura 28 | Unidades experimentais durante período de secagem..... | 60 |
| Figura 29 | Circuito RC série..... | 61 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 30 | Arranjo experimental. Gerador de sinais (a), cabo tipo PP com resistor (b), osciloscópio digital (c), dispositivo capacitivo (d) e recipiente contendo amostra de solo (e) | 62 |
| Figura 31 | Caracterização microestrutural do bloco de gesso | 65 |

CAPÍTULO 2

| | | |
|----------|---|-----|
| Figura 1 | Espectrofotômetro Beckman DU – 640B (a), aparato experimental utilizado no preparo das amostras (b) para determinação do teor de clorofila..... | 99 |
| Figura 2 | Representação esquemática da instalação dos tensiômetros | 100 |
| Figura 3 | Croqui da área experimental..... | 101 |
| Figura 4 | Área experimental. Início (a) e término aos 35 DAT (b) | 102 |
| Figura 5 | Desenvolvimento da alface romana com manejo da irrigação por meio de DC (a) e pelo TS (b) no final do experimento..... | 114 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|----------|--|-----|
| Figura 1 | Croqui da área experimental – casa de vegetação 01..... | 129 |
| Figura 2 | Croqui da área experimental – casa de vegetação 02 | 129 |
| Figura 3 | Fotos da área experimental durante a condução do experimento com a cultura do milho..... | 131 |
| Figura 4 | Dispositivo capacitivo em contato com a matriz do solo ao término do experimento com a cultura do milho..... | 151 |
| Figura 5 | Amostra de cilindro de cobre após término do experimento..... | 151 |
| Figura 6 | Amostras de cobre após 3 meses de exposição, submetida a 60 % de umidade do solo (a) e condição de saturação (b) | 152 |
| Figura 7 | Pontos de observação e análise nos cilindros de cobre após a condução do experimento..... | 153 |
| Figura 8 | Liga de Ni-Cu contendo <i>Aeromonas salmonicida</i> | 154 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Figura 9 | Indícios de formação de biofilme no cilindro de cobre..... | 155 |
|----------|--|-----|

CAPÍTULO 3

| | | |
|----------|---|-----|
| Figura 1 | Croqui da área experimental..... | 171 |
| Figura 2 | Fotos da área experimental durante a condução do experimento com a cultura do trigo..... | 173 |

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 1

| | | |
|------------|---|----|
| Gráfico 1 | Curva característica de retenção de água no solo - LVd | 56 |
| Gráfico 2 | Curva característica de retenção de água no solo - LVA | 58 |
| Gráfico 3 | Constituição química do material dielétrico utilizado entre os eletrodos (cilindros de cobre) na construção do DC | 64 |
| Gráfico 4 | Tensão elétrica de entrada aplicada nos DC..... | 67 |
| Gráfico 5 | Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 1 nos solos: (a) LVd e (b) LVA..... | 68 |
| Gráfico 6 | Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 2 nos solos: (a) LVd e (b) LVA | 70 |
| Gráfico 7 | Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 3 nos solos: (a) LVd e (b) LVA | 72 |
| Gráfico 8 | Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 4 nos solos: (a) LVd e (b) LVA | 73 |
| Gráfico 9 | Umidade volumétrica x tensão elétrica de saída | 75 |
| Gráfico 10 | Capacitância estimada para diferentes valores de umidades do solo e frequência do sinal: (a) LVd e (b) LVA (amostra 1) | 76 |
| Gráfico 11 | Capacitância medida com célula de gesso, com diferentes valores de massa de água, em função da frequência | 77 |
| Gráfico 12 | Capacitância elétrica medida em função da frequência | 78 |
| Gráfico 13 | Capacitância estimada, para diferentes valores de umidades do solo e frequência do sinal: (a) LVd e (b) LVA (amostra 2) | 79 |
| Gráfico 14 | Capacitância estimada, para diferentes valores de umidades do solo e frequência do sinal: (a) LVd e (b) LVA (amostra 3) | 81 |

CAPÍTULO 2

| | | |
|------------|---|-----|
| Gráfico 1 | Valores diários máximos, médios e mínimos da umidade relativa do ar registrado durante a condução do experimento | 106 |
| Gráfico 2 | Valores diários máximos, médios e mínimos da temperatura do ar registrado durante a condução do experimento | 107 |
| Gráfico 3 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 15 kPa | 108 |
| Gráfico 4 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos TS durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 15 kPa | 109 |
| Gráfico 5 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 30 kPa | 110 |
| Gráfico 6 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos TS durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 30 kPa | 111 |
| Gráfico 7 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 60 kPa | 111 |
| Gráfico 8 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos TS durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 60 kPa | 112 |
| Gráfico 9 | Número de irrigações registrado em função da tensão de água no solo e dispositivos | 113 |
| Gráfico 10 | Massa fresca comercial da alface romana em função das diferentes tensões de água no solo | 115 |
| Gráfico 11 | Volume de água aplicado durante o ciclo da cultura da alface romana em função da tensão de água no solo | 116 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|-----------|--|-----|
| Gráfico 1 | Valores diários máximos, médios e mínimos da umidade relativa do ar registrados durante a condução do experimento | 135 |
|-----------|--|-----|

| | | |
|------------|---|-----|
| Gráfico 2 | Valores diários máximos, médios e mínimos da temperatura do ar registrados durante a condução do experimento | 136 |
| Gráfico 3 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 20 kPa | 137 |
| Gráfico 4 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 20 kPa..... | 137 |
| Gráfico 5 | Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 20 kPa | 138 |
| Gráfico 6 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 40 kPa | 139 |
| Gráfico 7 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 40 kPa..... | 140 |
| Gráfico 8 | Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 40 kPa | 140 |
| Gráfico 9 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 80 kPa | 141 |
| Gráfico 10 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 80 kPa..... | 142 |
| Gráfico 11 | Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 80 kPa | 142 |
| Gráfico 12 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 120 kPa | 143 |
| Gráfico 13 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 120 kPa..... | 143 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Gráfico 14 | Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 120 kPa | 144 |
| Gráfico 15 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 180 kPa | 145 |
| Gráfico 16 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 180 kPa..... | 145 |
| Gráfico 17 | Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 180 kPa | 146 |
| Gráfico 18 | Número de irrigações registrado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo | 147 |
| Gráfico 19 | Volume de água aplicado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo | 147 |
| Gráfico 20 | Produtividade de grãos de milho BG7051H em função da tensão de água no solo..... | 150 |
| Gráfico 21 | Eficiência do uso da água pela cultura do milho em função da tensão de água no solo..... | 150 |

CAPÍTULO 4

| | | |
|-----------|--|-----|
| Gráfico 1 | Curva característica de retenção de água no solo | 169 |
| Gráfico 2 | Tensão de água no solo obtido por meio das leituras nos DC..... | 178 |
| Gráfico 3 | Valores diários máximos, médios e mínimos da umidade do ar observados durante o experimento | 179 |
| Gráfico 4 | Valores diários máximos, médios e mínimos de temperatura do ar observados durante o experimento | 180 |
| Gráfico 5 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 20 kPa | 181 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Gráfico 6 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 20 kPa..... | 182 |
| Gráfico 7 | Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 20 kPa | 183 |
| Gráfico 8 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 40 kPa | 184 |
| Gráfico 9 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 40 kPa..... | 184 |
| Gráfico 10 | Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 40 kPa | 185 |
| Gráfico 11 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 80 kPa | 185 |
| Gráfico 12 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 80 kPa..... | 186 |
| Gráfico 13 | Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 80 kPa | 187 |
| Gráfico 14 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 140 kPa | 187 |
| Gráfico 15 | Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 140 kPa..... | 188 |
| Gráfico 16 | Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 140 kPa | 189 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Gráfico 17 | Número de irrigações registrado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo | 190 |
| Gráfico 18 | Volume de água aplicado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo | 191 |
| Gráfico 19 | Eficiência do uso da água pela cultura do trigo em função dos tratamentos de tensão de água no solo | 194 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 Estimativa de perdas de produção, devido à salinidade | 32 |
| Tabela 2 Constante dielétrica de algumas substâncias | 43 |
| Tabela 3 Preço dos materiais utilizados na construção dos DC | 53 |
| Tabela 4 Granulometria e classificação textural dos solos LVd e LVA | 55 |
| Tabela 5 Pontos da curva característica de retenção de água no solo (LVd) | 56 |
| Tabela 6 Resultado da análise química do solo LVd | 57 |
| Tabela 7 Pontos da curva característica de retenção de água no solo (LVA) | 57 |
| Tabela 8 Resultado da análise química do solo LVA | 59 |
| Tabela 1 Fertilizantes e doses utilizadas na adubação da alface romana | 98 |
| Tabela 2 Resumo das análises de variância: massa fresca comercial por planta (M_{FC}), volume de água aplicado por planta (V_{APL}), clorofila total (CL_T) e eficiência de uso da água (EUA) em função dos dispositivos e da tensão de água no solo | 114 |

CAPÍTULO 3

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 Volume de água aplicado durante a condução do experimento para os diferentes tratamentos de tensão de água no solo e dispositivo | 148 |
| Tabela 2 Resumo da análise de variância: produtividade de grãos de milho e eficiência de uso da água em função da tensão de água no solo e dispositivos | 149 |
| Tabela 3 Composição química na superfície do cilindro de cobre observado após a condução do experimento | 154 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 Granulometria e classificação textural do LVd | 168 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| Tabela 2 Resultado da análise química do LVd da área experimental..... | 168 |
| Tabela 3 Pontos da curva característica de retenção de água do solo da área experimental..... | 169 |
| Tabela 4 Volume de água aplicado durante a condução do experimento para os diferentes tratamentos de tensão de água no solo e dispositivo | 191 |
| Tabela 5 Resumo da análise de variância: produtividade de grãos, número de grãos por espiga, massa seca da parte aérea e eficiência de uso da água em função dos tratamentos de tensão de água no solo e dos dispositivos utilizados no manejo da irrigação | 192 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----|
| | CAPÍTULO 1 Introdução Geral | 22 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 22 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 25 |
| 2.1 | Agricultura Brasileira | 25 |
| 2.2 | Irrigação no Brasil | 28 |
| 2.3 | Manejo da irrigação | 33 |
| 2.4 | Umidade do solo | 35 |
| 2.5 | Métodos de determinação da umidade do solo | 36 |
| 2.6 | Sensores Capacitivos | 42 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 49 |
| 3.1 | Construção do dispositivo capacitivo | 49 |
| 3.2 | Calibração dos dispositivos capacitivos | 53 |
| 3.2.1 | Solos utilizados para calibração | 55 |
| 3.2.2 | Correlação tensão elétrica de saída x umidade do solo | 59 |
| 3.2.3 | Correlação capacitância x umidade do solo | 61 |
| 3.2.4 | Avaliações | 63 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 64 |
| 4.1 | Caracterização química e microestrutural do bloco de gesso | 64 |
| 4.2 | Correlação tensão elétrica de saída x umidade do solo | 66 |
| 4.3 | Correlação capacitância x umidade do solo | 75 |
| 5 | CONCLUSÕES | 83 |
| | REFERÊNCIAS | 84 |
| | CAPÍTULO 2 Comparação de dispositivo capacitivo e tensiômetro, para monitoramento da umidade do solo | 91 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 93 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 94 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 97 |
| 3.1 | Adubação | 98 |
| 3.2 | Teor de clorofila total | 98 |
| 3.3 | Construção e instalação dos tensiômetros | 99 |
| 3.4 | Delineamento experimental | 100 |
| 3.5 | Sistema de irrigação | 101 |
| 3.6 | Instalação do experimento | 102 |
| 3.7 | Transplântio e manejo inicial | 103 |
| 3.8 | Manejo da irrigação | 103 |
| 3.9 | Cultivar de alface | 103 |
| 3.10 | Práticas culturais | 104 |
| 3.11 | Controle fitossanitário e adubação | 104 |
| 3.12 | Avaliações | 104 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.12.1 | Número de irrigações..... | 104 |
| 3.12.2 | Massa fresca comercial..... | 105 |
| 3.12.3 | Eficiência do uso da água | 105 |
| 3.13 | Análises estatísticas | 105 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 106 |
| 4.1 | Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação..... | 106 |
| 4.2 | Dispositivos empregados no manejo da irrigação..... | 107 |
| 4.3 | Número de irrigação..... | 112 |
| 4.4 | Produção de alface..... | 113 |
| 5 | CONCLUSÕES | 117 |
| | REFERÊNCIAS | 118 |
| | CAPÍTULO 3 Comparação de dispositivo capacitivo e sensor de matriz granular, no manejo da irrigação | 121 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 123 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 125 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 127 |
| 3.1 | Adubação..... | 127 |
| 3.2 | Sensores de matriz granular e dispositivo capacitivo..... | 128 |
| 3.3 | Delineamento experimental | 128 |
| 3.4 | Sistema de irrigação | 130 |
| 3.5 | Instalação do experimento | 130 |
| 3.6 | Semeadura e manejo inicial | 131 |
| 3.7 | Manejo da irrigação | 132 |
| 3.8 | Cultivar de milho | 133 |
| 3.9 | Práticas culturais | 133 |
| 3.10 | Controle fitossanitário e adubação | 133 |
| 3.11 | Avaliações..... | 134 |
| 3.12 | Análises estatísticas | 134 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 135 |
| 4.1 | Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação..... | 135 |
| 4.2 | Dispositivos empregados no manejo da irrigação..... | 136 |
| 4.3 | Número de irrigação e volume de água aplicado | 146 |
| 4.4 | Resumo das avaliações | 148 |
| 4.4.1 | Avaliação do dispositivo capacitivo | 151 |
| 5 | CONCLUSÕES | 156 |
| | REFERÊNCIAS | 157 |
| | CAPÍTULO 4 Manejo da irrigação utilizando leitor watermark® e dispositivo capacitivo | 160 |
| 1 | INTRODUÇÃO | 162 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 164 |
| 2.1 | Sensores de matriz granular | 164 |
| 2.2 | Cultura do trigo | 165 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 167 |
| 3.1 | Caracterização da área experimental | 167 |
| 3.2 | Solo utilizado no experimento | 167 |
| 3.3 | Calibração dos dispositivos capacitivos | 169 |
| 3.4 | Delineamento Experimental | 170 |
| 3.5 | Adubação | 171 |
| 3.6 | Sistema de irrigação | 172 |
| 3.7 | Instalação do experimento | 172 |
| 3.8 | Semeadura e manejo inicial | 174 |
| 3.9 | Manejo da irrigação | 174 |
| 3.10 | Cultivar de trigo | 175 |
| 3.11 | Práticas culturais | 175 |
| 3.12 | Controle fitossanitário e adubação de cobertura | 175 |
| 3.13 | Avaliações | 176 |
| 3.13.1 | Produtividade de grãos secos e matéria seca | 176 |
| 3.13.2 | Eficiência do uso da água | 176 |
| 3.13.3 | Análises estatísticas | 176 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 178 |
| 4.1 | Correlação tensão de água no solo x umidade do solo | 178 |
| 4.2 | Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação | 178 |
| 4.3 | Dispositivos empregados no manejo da irrigação | 181 |
| 4.4 | Número de irrigação e volume de água aplicado | 190 |
| 4.5 | Resumo das avaliações | 192 |
| 5 | CONCLUSÕES | 195 |
| | REFERÊNCIAS | 196 |
| | CONCLUSÃO GERAL | 199 |
| | APÊNDICES | 201 |

CAPÍTULO 1 Introdução Geral

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de prover alimentos à população, em quantidade e qualidade compatíveis com a crescente demanda, vem exercendo forte pressão sobre a utilização dos recursos naturais. Assim, garantir a produção de alimentos com o mínimo de degradação nos ecossistemas, constitui um enorme desafio para os agricultores, pesquisadores de ciências agrárias e gestores públicos.

No Brasil, estudos ambientais são exigidos para obter-se autorização governamental em atividades que utilizam recursos naturais ou que tenham potencial de causar degradação ambiental, com destaque para a agricultura. Este setor tem sido alvo de constantes questionamentos acerca dos impactos ambientais negativos gerados, principalmente, pela agricultura irrigada.

A irrigação é considerada a maior usuária de água no país. Estima-se que, no ano de 2012, foi irrigada uma área de 5,8 milhões de hectares. Apesar de a agricultura irrigada ser o principal uso consuntivo no Brasil, estudos têm evidenciado que, cultivos irrigados proporcionam aumento da oferta de alimentos e preços menores em relação àqueles produzidos em áreas não irrigadas, devido ao aumento substancial da produtividade. Globalmente, a produtividade obtida com a prática da agricultura irrigada é 2,7 vezes maior do que a obtida pela agricultura de sequeiro. De fato, a irrigação, sobretudo, nas regiões áridas e semiáridas do globo, tem favorecido a geração de emprego e maior rentabilidade nas propriedades rurais. Entretanto, é inquestionável que a ausência de um manejo correto da irrigação vem resultando na salinização de áreas agrícolas, na elevação do lençol freático, na perda de nutrientes e contaminação de pesticidas, com conseqüente poluição dos corpos hídricos.

As etapas de planejamento e dimensionamento de um projeto de irrigação são momentos cruciais para prever os possíveis impactos ambientais. Assim, a implantação de um projeto de irrigação além de atender à legislação ambiental, deve adotar critérios técnicos, durante o ciclo de determinada cultura vegetal, que melhore o uso da água a fim de mitigar os efeitos adversos provenientes da agricultura irrigada.

Sabe-se que, em quase todo território brasileiro, é reduzido o uso de qualquer método de manejo racional da água de irrigação. Tal situação se deve ao fato de que a maioria dos produtores rurais acredita que as tecnologias empregadas são caras, complexas, trabalhosas e não proporcionam ganhos econômicos compensadores.

Destarte, pesquisas científicas concernentes ao desenvolvimento de novos dispositivos e/ou instrumentos aplicados ao manejo de sistemas irrigados devem ser fomentadas, com objetivo de buscar soluções que aperfeiçoem o uso da água, e principalmente, a um custo acessível para os produtores rurais.

Dada relevância do assunto abordado, foi executado o presente trabalho que será apresentado em quatro capítulos. O primeiro refere-se ao desenvolvimento e calibração de dispositivos capacitivos (DC) capaz de estimar a umidade do solo por meio de um circuito RC (Resistor-Capacitor). No segundo capítulo, faz-se o uso dos DC no cultivo da alface romana a fim de avaliar a coerência dos valores ajustados pela equação de calibração no monitoramento da umidade do solo. De maneira similar, o terceiro capítulo refere-se ao uso dos DC, porém, a cultura vegetal utilizada foi o milho. Foram avaliadas também, neste capítulo, possíveis alterações físico-químicas em amostras dos materiais utilizados na construção dos DC. Tais amostras foram observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura. No quarto capítulo, os DC foram calibrados utilizando o instrumento da Watermark[®] e, posteriormente utilizados na condução do cultivo de trigo. Realizados os experimentos

supramencionados, realizou-se uma conclusão geral acerca da viabilidade de utilização dos DC, para os diferentes tipos de culturas vegetais, bem como suas limitações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Agricultura Brasileira

O desenvolvimento econômico de muitos países depende, basicamente, dos recursos da terra, seja por meio da exploração mineral ou extrativismo vegetal. A agricultura é responsável pela produção de alimentos, fibras, fitofármacos e commodities do agronegócio tendo implicações expressivas no produto interno bruto (PIB) brasileiro. Destaca-se, inclusive, na geração de energia (Figura 1).

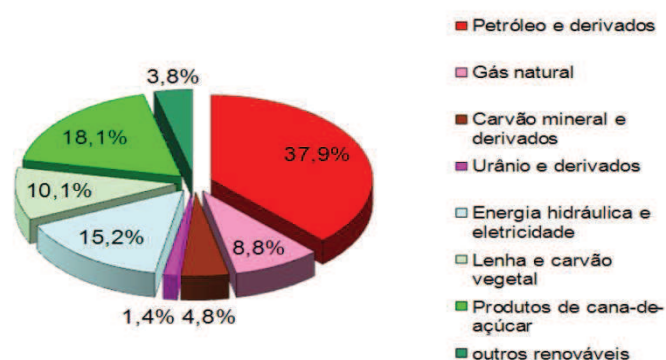


Figura 1 Matriz energética brasileira, ano 2010

Fonte: Adaptada de Brasil (2013b).

A agricultura contribui com 32% da matriz energética brasileira. Só o bagaço de cana garante 18% desta matriz, enquanto que todas as hidrelétricas contribuem com apenas 15% (BRASIL, 2013a). Além disso, o setor agrícola tem se destacado cada vez mais no cenário internacional pelos recordes de produtividade. Segundo Brasil (2012b), ao longo da última década, as exportações agrícolas brasileiras cresceram, em média, 17,3% ao ano. Foi o terceiro maior mercado exportador de produtos agrícolas em 2011, com US\$

81,8 bilhões em vendas externas, o que significou uma variação de 49,2% em relação aos US\$ 54,8 bilhões alcançados em 2009 (BRASIL, 2012b). Dados da Companhia Nacional de Abastecimento - Conab (2013) mostraram que, a produção de grãos da safra em 2012/13 estimada em 185,05 milhões de toneladas, foi 11,4% superior à safra 2011/12, quando atingiu 166,17 milhões de toneladas. A Figura 2 apresenta o volume da produção de cereais, leguminosas e oleaginosas, segundo as grandes regiões e unidades da federação (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE, 2013).

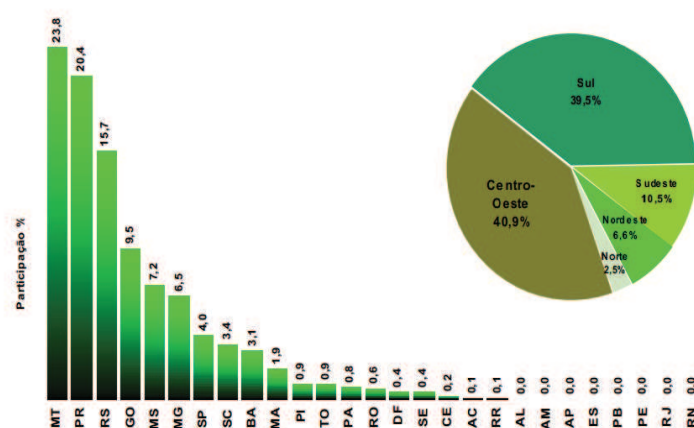


Figura 2 Participação na produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação
Fonte: Adaptada de IBGE (2013)

O volume da produção apresentou a seguinte distribuição: Centro-Oeste, 75,9 milhões de toneladas; Região Sul, 73,4 milhões de toneladas; Sudeste, 19,6 milhões de toneladas; Nordeste, 12,2 milhões de toneladas e Norte, 4,6 milhões de toneladas (IBGE, 2013).

De acordo com Christofidis (2013), entre os principais fatores do crescimento da produtividade situam-se os investimentos em modernização e implantação de equipamentos de irrigação, sementes melhoradas, variedades de

maior resposta, racionalização do plantio, aplicação de alta tecnologia, manejo do sistema de produção e desenvolvimento de capacidades dos produtores.

Para Cunha (2010), poucos países tem potencial de crescimento da produção agropecuária tão grande quanto o Brasil. Segundo esse autor, o desafio da política agrícola para as próximas décadas é assegurar que esse potencial se concretize condicionado à manutenção da competitividade externa num contexto de custos marginais crescentes, de maiores demandas sociais e de pressões pela sustentabilidade ambiental da agropecuária. O país avançou na produtividade agrícola, implementou medidas de preservação do meio ambiente e desenvolveu mecanismos de mitigação do risco agrícola, entretanto, ressaltam Contini, Pena Júnior e Vieira (2013) que, devido à complexidade do setor agrícola brasileiro na atualidade, essas iniciativas são insuficientes, requerendo avanços que vão além do setor agrícola. Para que os agricultores brasileiros continuem competitivos, neste setor, é necessário produzir cada vez mais com menor custo de produção.

A necessidade da otimização do uso dos recursos naturais, redução dos custos de produção, aumento de produtividade, no setor agrário, faz com que os produtores rurais adotem tecnologias capazes de tornar a exploração agrícola cada vez mais rentável. A irrigação é uma dessas tecnologias, capaz de fornecer água às culturas vegetais de maneira a atender as exigências hídricas durante todo seu ciclo, proporcionando altas produtividades, sem a necessidade de ampliação da área plantada e com produtos de melhor qualidade.

Segundo Folegatti et al. (2010), a irrigação é importante no contexto alimentar, pois, cada hectare irrigado equivale a 3 ha de sequeiro em produtividade física e 7 ha em produtividade econômica. Para Christofidis (2013), a produtividade obtida com a prática da agricultura irrigada é 2,7 vezes maior do que a obtida pela agricultura de sequeiro. Em muitos casos, a agricultura irrigada é a única maneira de garantir e/ou aumentar a produção

agrícola. Aggestam (2008) destaca que, 30% das batatas produzidas na região de East Anglia – Inglaterra depende do uso da irrigação. Madail et al. (2008), avaliando a viabilidade econômica da técnica de irrigação por gotejamento em pomares de pessegueiro na Região Sul do RS, observaram um acréscimo de 20% na produção, quando comparada àquele de pomares não irrigados.

Apesar do histórico de sucesso dos cultivos irrigados, é importante salientar que a irrigação por si só não determina melhores índices de produtividade e/ou qualidade. Devem-se adotar mecanismos que favoreçam a exploração agrícola como: práticas conservacionistas do solo, adequação quanto à recomendação de corretivos e adubações, utilização de informações acerca do zoneamento agroclimático, manejo integrado de pragas e doenças são algumas das ações indispensáveis para o êxito de qualquer cultivo irrigado.

2.2 Irrigação no Brasil

O Brasil possui uma área territorial estimada de 851 milhões de hectares, sendo 9,05% ocupadas com lavouras. Estima-se que 29,6 milhões de hectares sejam passíveis de irrigação, porém, somente uma pequena parcela é explorada (BRASIL, 2009). A Figura 3 apresenta o resultado da estimativa das demandas por tipo de uso consuntivo de recursos hídricos em 2010.

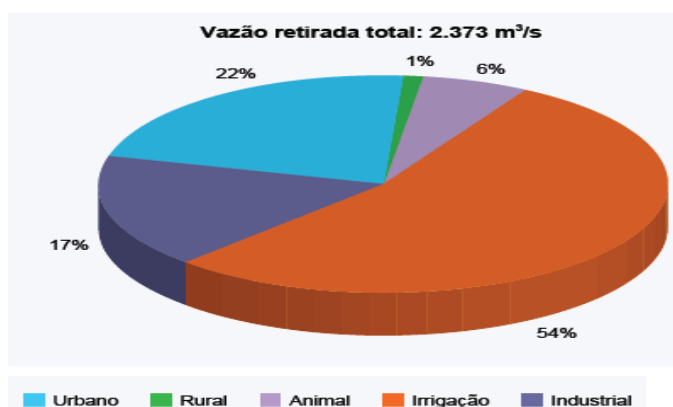


Figura 3 Demandas consuntivas dos recursos hídricos no Brasil em 2010
Fonte: Adaptada de Brasil (2012a)

Observa-se que a maior vazão de retirada foi para fins de irrigação, $1.270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, aproximadamente a 54% do total. De acordo com Brasil (2013a), no ano de 2012, foi irrigado 5,8 milhões de hectares. A FAO estimou um aumento de 11% na demanda de água pela agricultura irrigada no período entre 2008 e 2050.

Para Mukherji et al. (2009), a produção agrícola terá de aumentar em 70%, em termos mundiais e de 100% nos países em desenvolvimento, a fim de suprir a demanda por alimentos para um aumento de 40% da população mundial.

O Brasil assume o 16º lugar entre os países com maior área irrigada no mundo, detendo pouco mais de 1% da área mundial. Entre os anos de 1996 e 2006, a área irrigada (Figura 4) no Brasil aumentou 1,3 milhão de hectares, resultando, em um ritmo médio de 150 mil hectares por ano (FOLEGATTI et al., 2010). Segundo esses autores, o país possui um potencial de expansão para agricultura irrigada de cerca de 30 milhões de hectares.

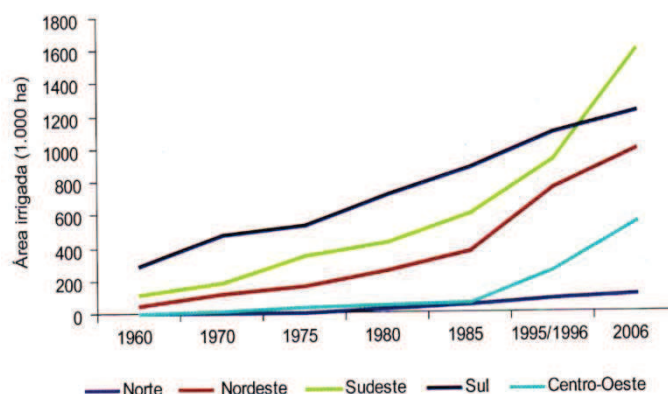


Figura 4 Evolução da área irrigada no Brasil
Fonte: Adaptada de Folegatti et al. (2010)

Dentro do panorama mundial sobre a agricultura irrigada (Figura 5), o Brasil apresenta condições favoráveis para o crescimento, porque ainda irriga muito pouco diante do potencial estimado.

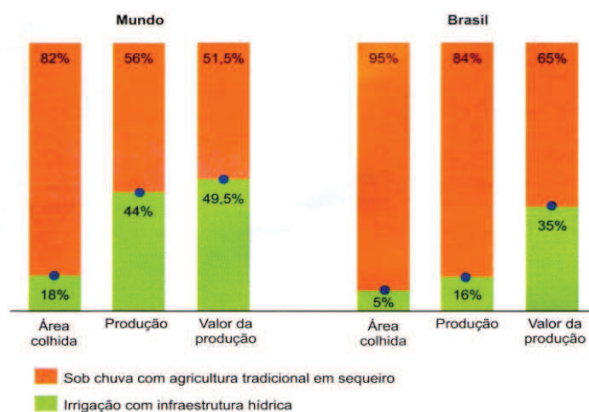


Figura 5 Agricultura irrigada no mundo e no Brasil
Fonte: Adaptada de Saturnino et al. (2010)

Um dos fatores a ser enfatizado, quando se pretende usar eficientemente a água de irrigação, é selecionar o sistema de irrigação mais apropriado para uma determinada situação. De acordo com Costa et al. (2010), os métodos de

irrigação classificam-se em não pressurizados e pressurizados. O método por superfície pode ser dividido em irrigação por sulco, inundação e faixa. Os métodos pressurizados classificam-se em aspersão e localizada. Na Figura 6, estão representadas as áreas irrigadas nas diferentes regiões administrativas, com os respectivos métodos de irrigação utilizados.

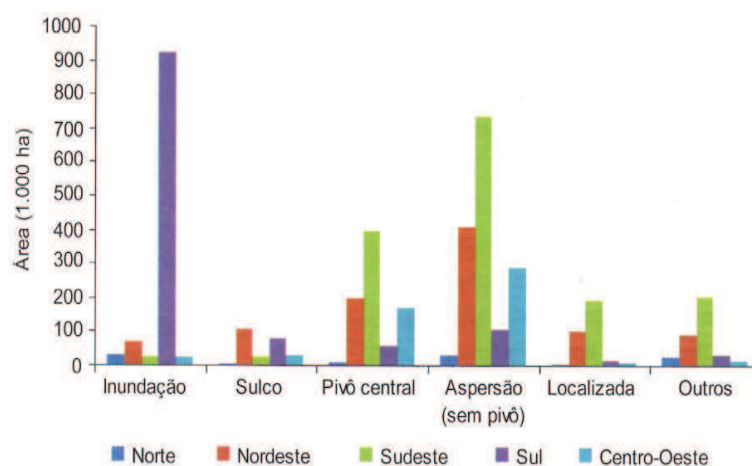


Figura 6 Área irrigada nas diferentes regiões administrativas brasileiras
Fonte: Adaptada de Folegatti et al. (2010)

Dada a importância da agricultura irrigada para o desenvolvimento econômico de determinada região, deve-se mencionar a existência de sérios problemas quanto aos impactos ambientais negativos que podem ser ocasionados pela falta de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA). De acordo com Beltrán (2010), aproximadamente 40% das áreas irrigadas do mundo estão localizadas em regiões áridas e semiáridas. Nessas regiões, a salinidade é comum em decorrência dos sais adicionados com a água de irrigação (Figura 7) e acúmulo de água subterrânea salina em terras com drenagem natural deficiente.

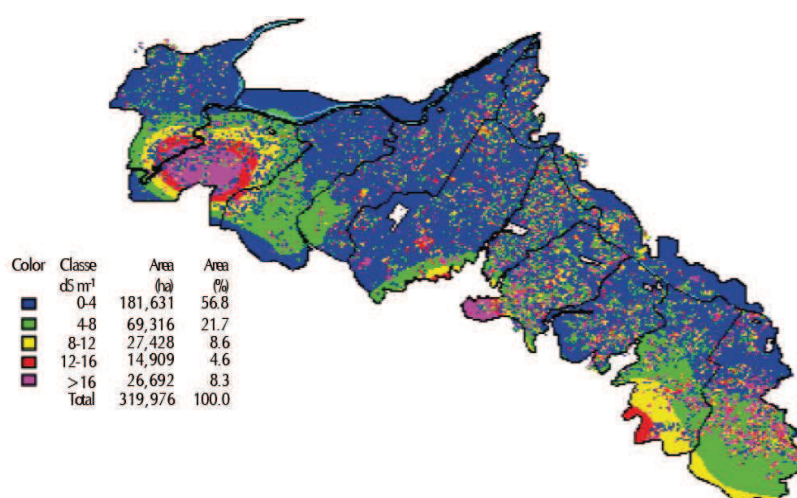


Figura 7 Áreas afetadas pela salinidade no distrito irrigado de Sinaloa, México
Fonte: Adaptada de Beltrán (2010)

O impacto econômico da salinidade do solo na agricultura irrigada tem sido estimado. Por exemplo, este tipo de avaliação foi realizado no Rio Forte, distrito irrigado de Sinaloa, México, onde a salinidade do solo tem limitado a produção agrícola. As perdas na produção de algumas culturas (Tabela 1) em decorrência da salinidade, na região supracitada, totalizaram cerca 24,9 milhões de reais (ano base de 2000).

Tabela 1 Estimativa de perdas de produção, devido à salinidade

| Cultura | Área (ha) | Produção estimada (t) | Perda na produção (t) |
|----------------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Milho (outono/inverno) | 84490 | 548127 | 81713 |
| Milho (primavera/verão) | 28276 | 191873 | 15434 |
| Sorgo | 14975 | 60790 | 4599 |
| Algodão | 4163 | 14928 | 1215 |
| Trigo | 3129 | 12774 | 1721 |

Fonte: Adaptada de Beltrán (2010)

Esses dados geram reflexões acerca de novos mecanismos para assegurar a sustentabilidade da agricultura irrigada, sob a perspectiva da segurança alimentar, fatores econômicos e proteção dos recursos naturais. Neste contexto, a adoção de práticas de manejo do solo e da água, constitui ferramenta indispensável para viabilizar a exploração agrícola.

2.3 Manejo da irrigação

Nas últimas décadas, resultados de pesquisa científica têm evidenciado que a técnica de irrigação, associada às demais atividades agrícolas (adubação, aplicação de defensivos, práticas conservacionistas do solo etc.), serão imprescindíveis para suprir a demanda mundial de alimentos. Neste contexto, para que os usuários da agricultura irrigada viabilizem o uso dos sistemas de irrigação, recomenda-se a adoção de critérios técnico-econômicos de manejo da irrigação a fim de garantir a sustentabilidade das áreas irrigadas. Com um manejo adequado da irrigação, pode-se economizar água, energia, aumentar a produtividade da cultura e melhorar a qualidade do produto. De acordo com Albuquerque (2008), a água no contexto da agricultura irrigada contribui com aproximadamente 38% do custo de produção.

Estima-se que 63% dos lotes irrigados no norte de Minas Gerais estavam aplicando excesso de água e que as dotações de irrigação eram constantes e iguais às determinadas no projeto para o ano todo (RESENDE; ALBUQUERQUE; COUTO, 2003).

Segundo Busato et al. (2012), no Brasil, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não adota qualquer estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação. Para 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. O

manejo da irrigação ainda é um problema sério para os gestores de recursos hídricos (GANJI; SHEKARRIZFARD, 2012). Esse tema é bastante recorrente em palestras, seminários e reuniões de representantes públicos nas diversas regiões do mundo. Yakubov (2012) realizou estudos a fim de entender a situação dos agricultores sobre o desempenho do serviço de irrigação em três países da Ásia Central (Quirguistão, Tadjiquistão e Uzbequistão). Os resultados ajudaram a compreender as experiências reais dos agricultores, prioridades e sua satisfação/insatisfação com os serviços de irrigação. Segundo Mukherji et al. (2009), a China tem feito progressos significativos na economia de água utilizadas para a agricultura, graças a inovações institucionais e tecnológicas. Na última década, o uso da água de irrigação da China por hectare reduziu 23,02% em todo o país.

Especialistas do setor são unânimes ao ressaltar a importância da adequada aplicação de água ao solo, devido suas implicações diretas no custo de produção e na degradação da bacia hidrográfica. Assim, na perspectiva de gerir os recursos hídricos, o manejo correto da irrigação depende do emprego de tecnologias compatíveis. Em outras palavras, o manejo adequado deve utilizar parâmetros que auxiliem na determinação do momento de irrigar e parâmetros para definir a quantidade de água a ser aplicada pelo sistema de irrigação. Neste sentido, para auxiliar o usuário da agricultura irrigada a tomar a decisão mais apropriada, diferentes métodos têm sido desenvolvidos, em que 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(m) ciente(s) da variabilidade espacial e temporal de alguns atributos físico-hídricos do solo, tendo implicações na escolha do método a ser empregado. Estratégias de manejo das irrigações fundamentam-se em

dados obtidos do clima, da cultura vegetal, do solo ou na combinação de dois ou três desses dados.

2.4 Umidade do solo

A umidade do solo em geral, refere-se à quantidade de água armazenada na região do solo não saturado (SENEVIRATNE et al., 2010). A determinação da quantidade de água no solo é um parâmetro imprescindível para a engenharia (projetos de estradas, estabilidade de taludes naturais, contenção de encostas, pressão de pré-consolidação e outras). Na agricultura a informação da quantidade de água, serve de suporte de decisão para algumas práticas agrícolas (tráfego de máquinas, colheita) sendo, inclusive, o parâmetro fundamental para o cálculo da quantidade de água a ser aplicada por um sistema de irrigação.

De acordo com Rivera et al. (2012), a umidade do solo é a principal ligação entre os compartimentos hidro ecológicos (por exemplo, a interação de águas subterrâneas com a superfície, evapotranspiração), modulação física, química e processos biológicos no solo.

Em áreas agrícolas, onde a água é um insumo, às vezes muito limitante, a determinação da umidade do solo se faz necessária para auxiliar o crescimento adequado das culturas vegetais.

Segundo El Marazky, Mohammad e Al-Ghobari (2011), os recentes avanços tecnológicos tornaram o uso de sensores de umidade do solo uma operação eficiente em sistemas de irrigação. Esses autores destacam a utilização dos sensores em várias práticas de gestão de recursos naturais, tais como a pesquisa sobre o rendimento das culturas, manejo de bacias hidrográficas, monitoramento ambiental, agricultura de precisão e manejo da irrigação.

Pelo potencial aumento da eficiência do uso dos recursos água, solo, energia elétrica, redução de mão de obra e, principalmente, pela necessidade de

desenvolver uma agricultura sustentável, tem ocorrido um aumento no interesse dos gestores públicos, pesquisadores e produtores rurais na utilização de instrumentos e dispositivos eletrométricos capazes de monitorar e medir as grandezas físicas, químicas e biológicas do ambiente agrícola. O registro contínuo de algumas dessas grandezas, são necessários para nortear as decisões quanto à conservação do solo, monitoramento e preservação de fauna aquática, além do controle dos sistemas de irrigação, época de colheita, previsão de safra, reduzindo possíveis riscos de investimento.

2.5 Métodos de determinação da umidade do solo

Atualmente, há uma variedade de métodos para medir e monitorar a umidade do solo. Segundo Oliveira (2010), os principais métodos ou técnicas utilizadas para se determinar o teor de água no solo são comumente divididos em **direto** e **indireto**. O método direto é mais simples e permite a obtenção direta da umidade do solo, enquanto que os métodos indiretos medem propriedades do solo dependentes do teor de água.

Segundo Freitas et al. (2012), os métodos eletrométricos que envolvem grandezas elétricas (tensão, corrente, frequência, resistência, capacitância) vêm ganhando espaço devido a sua versatilidade, com possibilidade de automatizar a aquisição de dados. A seguir é apresentada, de forma sucinta, a descrição de alguns métodos para determinação da umidade do solo.

Método gravimétrico: nesse método, amostras de solos úmidos são removidas do campo e a quantidade de água é determinada em relação à massa seca (KLAR, 1984). A secagem das amostras úmidas é realizada em estufa sob uma temperatura de 105-110 °C, por um período mínimo de 24 horas, e a porcentagem de umidade é determinada conforme a equação 1;

$$\text{Umidade (\%)} = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que,

M_1 = Massa do recipiente + amostra retirada do campo (g)

M_2 = Massa do recipiente + amostra seca (g)

M_3 = Massa do recipiente (g)

Segundo Dobriyal et al. (2012), esse método é amplamente utilizado para a determinação da umidade do solo. Entretanto, ressaltam os autores, que o método gravimétrico apresenta limitação no monitoramento da umidade ao longo do perfil do solo, sobretudo, em solos heterogêneos. De acordo com Oliveira (2010), o método gravimétrico é considerado como referência.

Método nuclear: segundo Oliveira (2010), as técnicas utilizadas neste método são duas: a moderação de nêutrons e a atenuação gama. De acordo com Reichardt e Timm (2012), desde a década de 1960, o método de moderação de nêutrons tem sido aplicado com sucesso na determinação de umidade do solo. O princípio de funcionamento do método da moderação de nêutrons, segundo Oliveira (2010) é, resumidamente, o seguinte: nêutrons rápidos (10 keV a 20 MeV) emitidos de uma fonte (normalmente amerício berílio) são termalizados, isto é, desacelerados ou tornados nêutrons lentos (0,01 a 0,3 e V) pelos átomos de hidrogênio no solo, detectados (contador proporcional de BF_3 , contador proporcional de ^3He , cristal de cintilação) no interior do solo e registrados num *scaler* a sua superfície. Portanto, quanto mais átomos de hidrogênio maior a contagem de nêutrons no registrador (Figura 8).

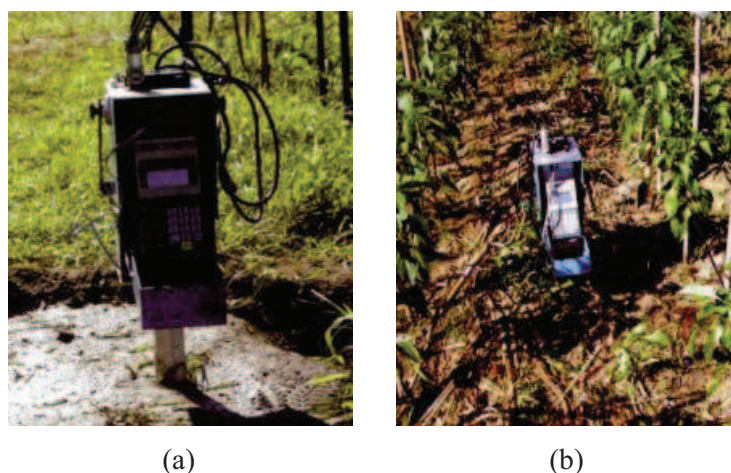


Figura 8 Sonda de nêutrons instalada em uma bacia de calibração (a) e área cultivada com pimentão (b)

Fonte: Adaptada de Carvalho e Oliveira (2012)

O método da atenuação da radiação gama, baseia-se na conhecida interação da radiação gama com a matéria. Assim, ressalta Oliveira (2010), se um feixe colimado de raios gama é colocado a atravessar um determinado material, alguns raios passam sem sofrer qualquer interação, enquanto que outros interagem e são espalhados, isto é, desviados de sua rota original. Como esta interação se dá com os elétrons orbitais dos átomos (efeitos Compton e fotoelétrico), a quantidade que se espalha depende da densidade de elétrons do material que, no caso do solo, é determinada pela sua densidade e o conteúdo de água; assim, quanto maior a densidade do solo e quanto maior o conteúdo de água no solo, maior o espalhamento da radiação gama. Um aparelho dessa natureza deve ser calibrado (de forma empírica) para cada tipo de solo (REICHARDT; TIMM, 2012). Ainda segundo esses autores, o maior problema dessa técnica é a medida exata da espessura do solo atravessada pelo feixe de radiações, pois, pequenas variações na espessura levam a grandes erros na densidade e umidade do solo.

Reflectometria no domínio do tempo (TDR): segundo Reichardt e Timm (2012), é uma técnica usada para medir a umidade volumétrica do solo, baseada no efeito da umidade sobre a velocidade de propagação de microondas (ondas eletromagnéticas de frequência no intervalo 50 MHz a 10 GHz) em cabos condutores que são introduzidos no solo, na região em que se deseja medir. A velocidade de propagação depende do meio que envolve o cabo, isto é, da constante dielétrica. De acordo com Oliveira (2010), o procedimento de medida da constante dielétrica usando TDR, amplamente difundida nos últimos anos, foi introduzido por Fellner-Feldegg, em 1969 e aprimorado para a utilização na determinação da quantidade de água no solo por Davis e Chudobiak, em 1975. Essa técnica apresenta boa precisão, sendo usada como referência para outros métodos indiretos (MITTELBACH; LEHNER; SENEVIRATNE, 2012).

Reflectometria no domínio da frequência (FDR): os sensores de capacitância (FDR) também são usados para estimar a umidade do solo. Segundo Reichardt e Timm (2012), eles são confundidos com os sistemas da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), pois, ambos medem a constante dielétrica do solo. Porém, a FDR mede o tempo de carga de um condensador, sendo em função da constante dielétrica do solo que rodeia o condensador, já a TDR determina a constante dielétrica de um meio, medindo o tempo de propagação de uma onda eletromagnética por uma linha de transmissão, sendo função da constante dielétrica do meio que rodeia a linha de transmissão. Dentre as vantagens em relação a outros métodos, cita-se a obtenção da umidade do solo de forma contínua e sem destruir as propriedades do solo, facilidade no transporte e não possui radioatividade. Martí, Gasque e Altozano (2013) descrevem a aplicação de redes neurais artificiais para estimar o potencial de água no caule em citrus por meio da determinação da umidade volumétrica do solo (Figura 9). A umidade do perfil do solo foi monitorada em tempo real,

usando uma sonda multi-sensor de capacitância (Enviro SCAN) com base na FDR.

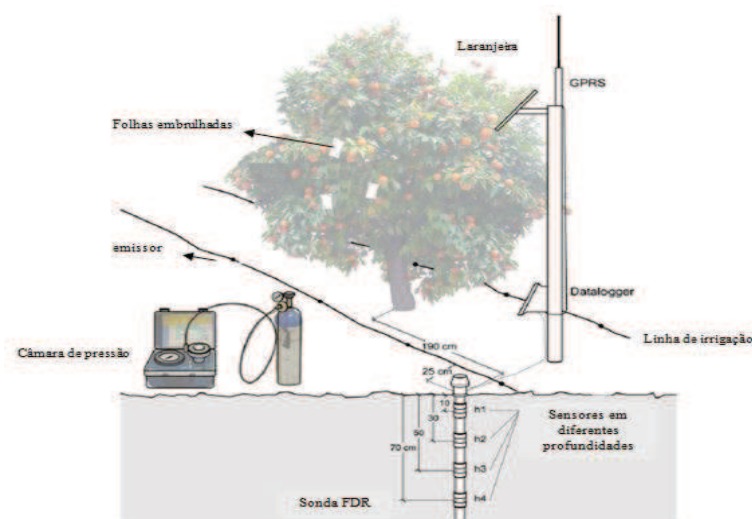


Figura 9 Esquema de instalação da sonda e pontos de medição
Fonte: Adaptada de Martí, Gasque e Altozano (2013)

Método dos blocos de resistência elétrica: segundo Scanlon, Andraski e Bilskie (2002), os sensores de resistência elétrica têm sido utilizados por mais de 60 anos em aplicações agrícolas. A resistência é medida por meio de dois eletrodos metálicos inseridos em blocos de gesso, fibra de vidro, ou de nylon. Apesar de a resistência elétrica do sensor variar, principalmente, em função do teor de água, a salinidade e temperatura também influenciam nas medidas. Mais recentemente, foram desenvolvidos sensores de matriz granular que consistem de um bloco de gesso incorporado numa matriz granular (Figura 10).



Figura 10 Sensor de matriz granular Watermark[®]

Para Nolz, Kammerer e Cepuder (2013) esses sensores são de custo acessível, fáceis de instalar, fornecem resultados confiáveis, requerem pouca manutenção, e podem ser integrados a sistemas de sensores sem fio. Vellidis et al. (2008), realizando manejo da água de irrigação com sensores de matriz granular, na cultivo do algodão (Figura 11a) e amendoim (Figura 11b), ressaltam o potencial desse sensor associado à tecnologia *wireless*.

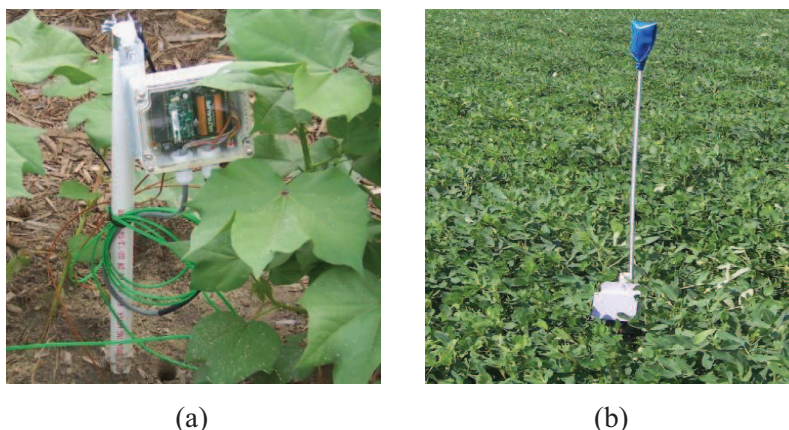


Figura 11 Unidade de comunicação inteligente com SMG e dois termopares instalados em campo: plantio do algodão (a) e com cultivo de amendoim (b)

Fonte: Adaptada de Vellidis et al. (2008)

Apesar dos benefícios supramencionados, Scanlon, Andraski e Bilskie (2002) salientam algumas fontes de erro como: alterações na calibração com o

passar do tempo, efeitos da salinidade (acima de $0,2 \text{ S.m}^{-1}$) e principalmente a entrada de ar na matriz do material.

2.6 Sensores Capacitivos

Esses sensores são amplamente utilizados e seu princípio de funcionamento é baseado na variação de capacitância. Tal grandeza elétrica está relacionada à quantidade de carga Q armazenada nas placas ou cilindros quando submetido a uma determinada tensão elétrica V , tendo como unidade de medida no SI (Sistema Internacional), o Farad. Os valores da capacitância podem ser alterados, dentre outras formas, pela natureza do material dielétrico existente entre as placas. Michael Faraday foi pioneiro nesse assunto e em 1837, usando um equipamento simples, descobriu que a capacitância aumentava de um fator numérico κ , que ele chamou de constante dielétrica (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2001). A água sendo uma substância dipolar (Figura 12), e se essa estiver entre as placas de um capacitor, influenciará acentuadamente as cargas que estão entre tais placas (VLACK, 1973), conseqüentemente, aumentando a capacitância (Figura 13).



Figura 12 Molécula de água
Fonte: Adaptada de Halliday, Resnick e Walker (2001)

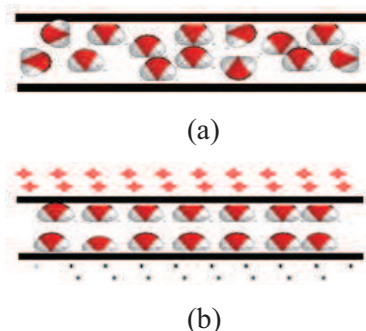


Figura 13 Representação esquemática da distribuição desordenada das moléculas dipolares de água (a) e após a polarização (b) num material dielétrico

A capacidade de um material dielétrico ser polarizado por um campo elétrico é variável de acordo com suas propriedades intrínsecas. Isto é descrito pela permissividade do meio (ϵ). A constante dielétrica (κ) é um índice que expressa a permissividade do meio em relação à **permissividade do vácuo** ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F. m}^{-1}$). Logo, $\kappa = \epsilon/\epsilon_0$. A Tabela 2 apresenta algumas substâncias e suas respectivas constantes dielétricas.

Tabela 2 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)

Para o ar, κ é praticamente igual ao do vácuo ($\kappa = 1$). O valor para o solo seco é de aproximadamente 4. A relação entre a constante dielétrica de um solo e a umidade volumétrica tem sido extensivamente estudada (BENEDETTO, 2010). O valor de κ para a água é cerca de 80 (FRANGI et al., 2009;

RUSINIAK, 2002). Estudo realizado por Mohsen-Nia, Amari e Jazi (2010) para determinar a constante dielétrica de alguns fluídos, dentre eles a água, corroboram o valor da constante dielétrica supracitada. Devido a essa propriedade da água, pode-se determinar a umidade volumétrica do solo indiretamente, pois, conforme destaca Hillel (2004), o teor de água no solo determina a sua constante dielétrica, conseqüentemente, haverá um incremento na capacitância. Medir o teor de água do solo pela determinação da capacitância não é uma ideia nova (ANDERSON, 1943; ANDERSON; EDLEFSEN, 1942; PLATER, 1955). Vale ressaltar que, o tipo de sinal e frequência aplicados nas placas do capacitor têm efeito significativo nos valores da capacitância. Segundo Kumhala, Václav e Blahovec (2009), as propriedades dielétricas de muitos materiais dependem da frequência (Figura 14), teor de água, densidade, composição química e da associação do momento dipolo permanente da água e outras moléculas constituintes.

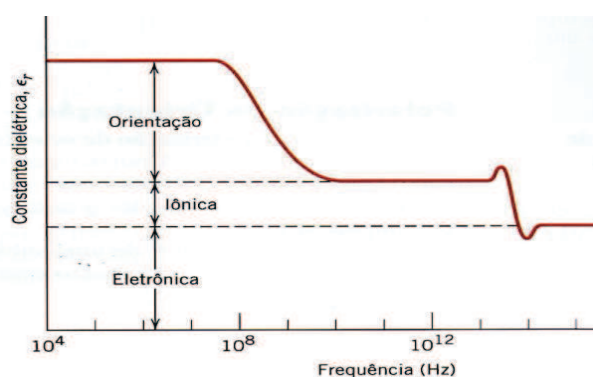


Figura 14 Variação da constante dielétrica em função da frequência de um campo elétrico alternado

Fonte: Adaptada de Callister Jr. e Rethwisch (2013)

O material dielétrico possui mecanismos de polarização, ou seja, quando se estabelece um campo elétrico (\mathcal{E}) entre os eletrodos de um capacitor, certos

mecanismos respondem em diferenciados tempos à ação desse campo, sendo alguns mais lentos e outros mais rápidos, denominados de polarização lenta e polarização rápida, respectivamente (ROBERT; KOWALSKI; GOMES, 2008).

Polarização eletrônica: é devida ao deslocamento da nuvem eletrônica em relação ao núcleo do átomo (Figura 15) e ocorre num intervalo de tempo inferior a 10^{-15} segundos. De acordo com Robert, Kowalski e Gomes (2008), este mecanismo é independente da temperatura.



Figura 15 Polarização eletrônica
Fonte: Adaptada de Callister Jr. e Rethwisch (2013)

Polarização iônica ou molecular: resulta do deslocamento mútuo entre íons constituintes da molécula (Figura 16). Ocorre em intervalos de tempo da ordem de 10^{-13} segundos, sendo praticamente independente da temperatura.

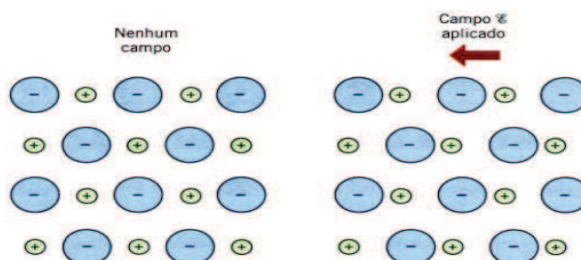


Figura 16 Polarização iônica
Fonte: Adaptada de Callister Jr. e Rethwisch (2013)

Polarização dipolar ou orientacional: encontrada somente em substâncias com momentos de dipolo permanente. Segundo Callister Jr. e Rethwisch (2013), a polarização resulta de uma rotação dos momentos permanentes na direção do campo aplicado (Figura 17). Essa tendência de alinhamento é contraposta pelas vibrações térmicas dos átomos, tal que a polarização diminui com o aumento da temperatura.



Figura 17 Dipolos elétricos permanentes (setas)
Fonte: Adaptada de Callister Jr. e Rethwisch (2013)

A polarização total de uma substância é igual à soma das polarizações eletrônica, iônica e de orientação. Em situações práticas, ressaltam Callister Jr. e Rethwisch (2013), um campo elétrico alternado aplicado muda de direção com o tempo. Com essa mudança, os dipolos tentam reorientar-se com o campo em um processo que requer um tempo finito. Para cada tipo de polarização existe um tempo mínimo de reorientação, o qual depende da facilidade com que os dipolos específicos são capazes de realinhar. Uma frequência de relaxação é tomada como o inverso desse tempo mínimo de reorientação. Um dipolo não consegue manter a mudança na direção de sua orientação quando a frequência do campo aplicado excede sua frequência de relaxação e desta forma não contribuirá para a constante dielétrica (CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2013). Ainda segundo esses autores, existe uma perda dielétrica (Figura 18) que é a absorção de

energia elétrica por um material dielétrico que está sujeito a um campo elétrico alternado. Essa perda pode ser importante em frequências do campo elétrico na vizinhança da frequência de relaxação para cada um dos tipos de dipolos operacionais em um material específico. Deseja-se uma baixa perda dielétrica na frequência de utilização.

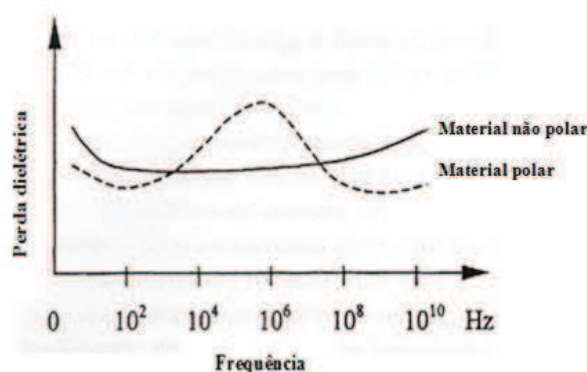


Figura 18 Perda dielétrica em função da frequência do sinal aplicado
Fonte: Adaptado de Webster (1999)

De acordo com Webster (1999), em materiais polares, a polarização provoca oscilações em determinadas frequências, resultando em alta perda. Chang et al. (2007), desenvolvendo a estrutura de um novo eletrodo, para medir o teor de água, destacam a consequência da alta frequência (efeito pelicular), em que parte da corrente elétrica passa através da superfície do condutor, tendo influência significativa nos resultados. De acordo com Feynman, Leighton e Sands (2010), para frequências acima de algumas dezenas de kHz, observa-se que a resistência dos fios metálicos aumenta com a frequência devido a que quase toda a corrente passa apenas por uma camada fina perto da superfície (Figura 19b), tal fenômeno é conhecido como **efeito pelicular**.

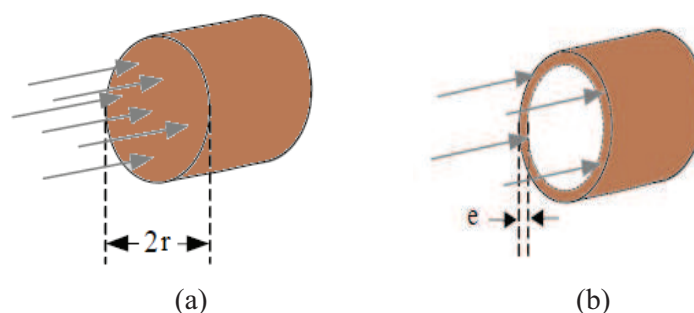


Figura 19 Efeito pelicular: a baixas frequências (a) a corrente passa por toda a seção transversal de um fio condutor, e a altas frequências (b) passa apenas por uma camada de espessura e

Fonte: Adaptado de Fragnito (2010)

O desenvolvimento de diferentes sensores e instrumentos para monitorar a umidade do solo ou condição hídrica da planta tem favorecido grandes avanços nas técnicas de manejo da água de irrigação. Entretanto, em decorrência da complexidade das propriedades dos materiais utilizados e dos fenômenos físicos envolvidos na construção desses sensores e instrumentos, torna-se fundamental pesquisas mais detalhadas a acerca desses fatores em nível operacional (ambiente agrícola).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O dispositivo capacitivo (DC) foi construído no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, Lavras – Minas Gerais e teve início no dia 10/04/2012.

3.1 Construção do dispositivo capacitivo

Para construção do DC utilizou-se, como material dielétrico, gesso pedra especial tipo IV, microgranulado, da marca Herostone (Figura 21a). A escolha do gesso foi devida a sua característica higroscópica, fácil moldagem e preço acessível. Para caracterização desse gesso, amostras foram montadas em stubs, metalizadas no aparelho evaporador de carbono modelo Union CED 020 e observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 20a) modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss e qualificadas/quantificadas quanto à composição química por Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva no aparelho Quantax XFlash 5010 Bruker (Figura 20b).

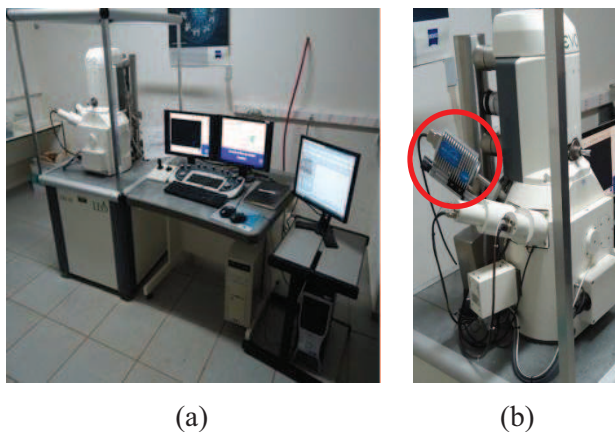


Figura 20 Microscópio eletrônico de varredura (a), Instrumento de EDS (b)

A mistura (água destilada + gesso com relação - 1 mL/2,5 g) foi homogeneizada num bécker (Figura 21b) para, posteriormente, ser moldada nas formas de alumínio (Figura 21c). De acordo com Freitas (2011), a mistura 1 mL/2,5 g apresenta uma viscosidade adequada que facilita durante o preenchimento das formas de alumínio. Após um período de 48 horas de secagem ao ar, o bloco de gesso foi retirado da forma de alumínio.

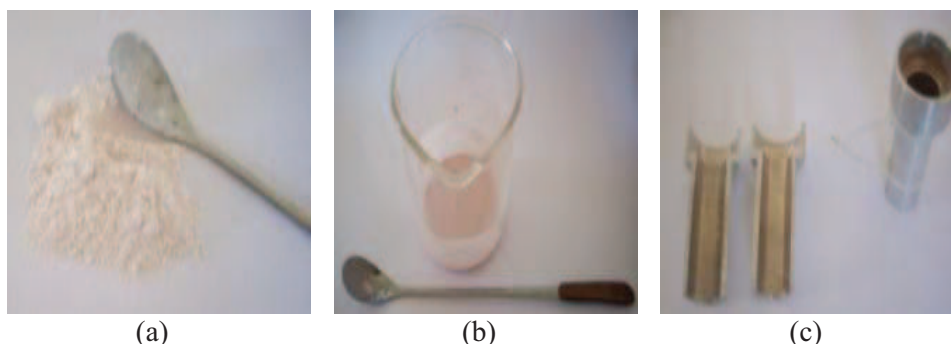


Figura 21 Material dielétrico e formas: gesso em pó (a), mistura gesso e água (b) e formas de alumínio (c)

Os DC usados no experimento foram construídos utilizando um formato cilíndrico e testados no Laboratório de Hidráulica do DEG. Para sua construção, foram utilizados tubos de cobre com 15 e 22 mm de diâmetro externo (eletrodos), tubo de PVC de $\frac{3}{4}$, solda à base de estanho, 0,60 m de cabo tipo PP de cobre de $0,75 \text{ mm}^2$, ferro de solda e paquímetro digital (Figura 22).

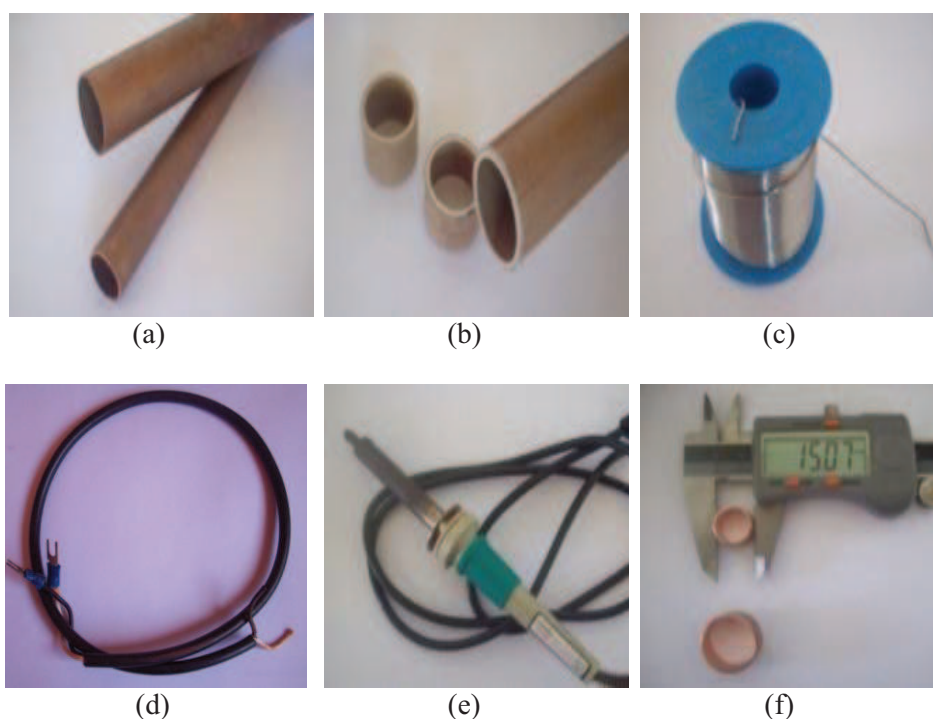


Figura 22 Materiais utilizados na construção do DC: tubos de cobre (a), tubos de PVC (b), solda a base de estanho (c), cabo PP 0,75 mm² (d), ferro de solda (e), paquímetro digital (f)

Utilizando cortador específico, realizou-se o corte dos tubos de cobre e de PVC com altura de (12 mm e 14 mm) respectivamente (Figura 23a). 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 23b). A etapa seguinte consistiu em soldar os terminais do cabo PP 0,75 mm² no interior do eletrodo (Figura 23c). Na sequência, esse conjunto foi colocado na forma de alumínio para preenchimento com a mistura água/gesso (Figura 23d) sendo retirado o excesso. Após 5 minutos, o eletrodo de 15 mm de diâmetro foi inserido no interior do eletrodo de 22 mm de maneira concêntrica (Figura 23e). Após secar ao ar (Figura 23f) durante um período mínimo de 24 horas, esse conjunto foi retirado da forma de alumínio para soldagem do outro terminal no

eletrodo menor (Figura 23g). Terminada a construção do DC, prosseguiu-se com a calibração.

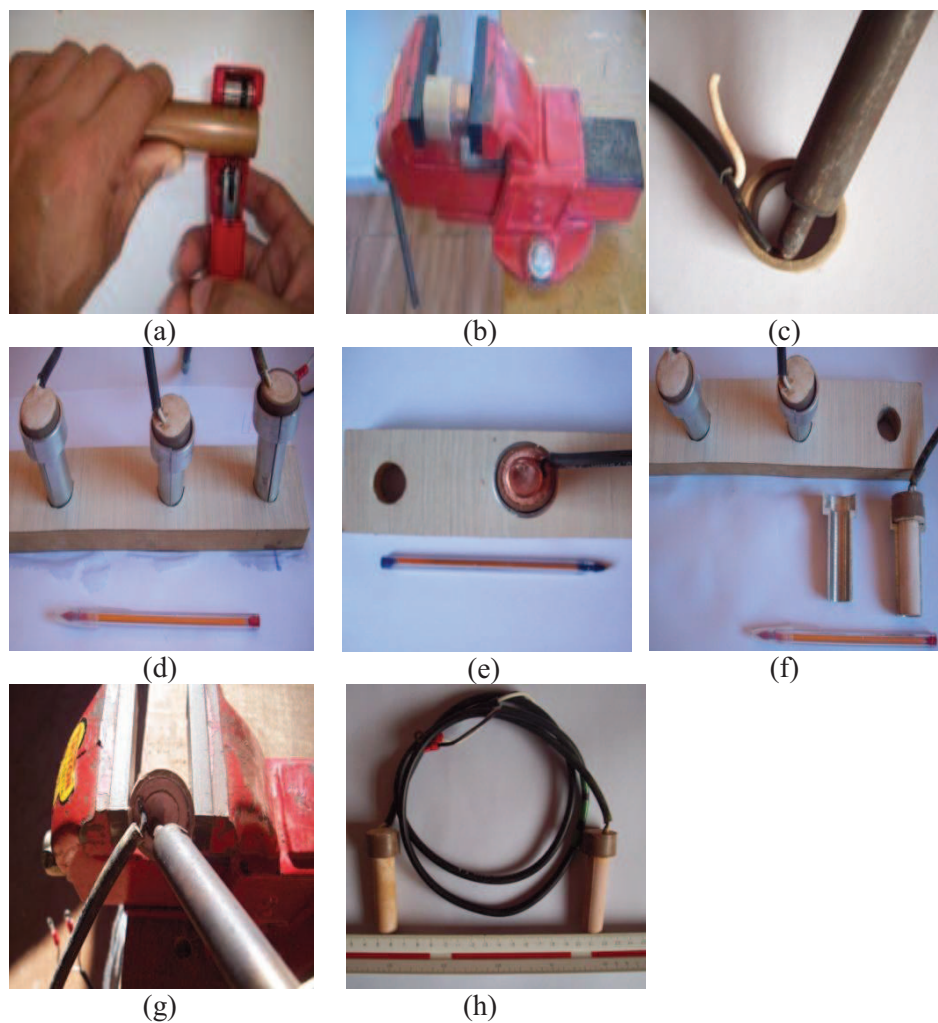


Figura 23 Etapas da construção do DC: corte do tubo de cobre (a), inserção do eletrodo externo (b), soldagem de fio no eletrodo externo (c), preenchimento das formas (d), inserção do eletrodo interno (e), período de secagem (f), soldagem de cabo PP - eletrodo interno (g), capacitores cilíndricos (h)

Na Figura 24, é demonstrado, de maneira esquemática, as dimensões adotadas na construção do DC.

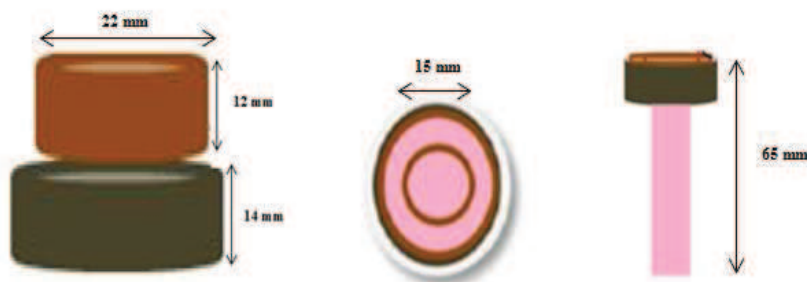


Figura 24 Dimensões (fora de escala) adotadas na construção do DC

Na Tabela 3, são mostrados os preços dos materiais utilizados na construção do DC, os mesmos foram obtidos no comércio do município de Lavras no dia 30/12/2013.

Tabela 3 Preço dos materiais utilizados na construção dos DC

| Materiais | Preço (R\$) | Unidade | Preço unitário (R\$) |
|-----------------------------------|-------------|-----------|----------------------|
| Cabo tipo PP 0,75 mm ² | 1,50 | metro | 0,90 |
| Tubo de cobre Φ 15 mm | 14,90 | metro | 0,20 |
| Tubo de cobre Φ 22 mm | 18,24 | metro | 0,24 |
| Tubo de PVC 3/4" | 1,80 | metro | 0,03 |
| Gesso tipo IV | 24,71 | kilograma | 1,12 |
| Total | 59,35 | | 2,49 |

3.2 Calibração dos dispositivos capacitivos

As diferentes formas de onda aplicadas nos DC foram originadas de um gerador de sinais (Figura 25). Este instrumento fornece sinais alternados de amplitude e frequência ajustáveis. Utilizou-se um gerador de sinais da marca Minipa, modelo MFG-4221 capaz de gerar formas de onda senoidal, quadrada, triangular e varredura na faixa de frequência de 0,2Hz a 20 MHz com ajuste de

amplitude. Os DC foram submetidos a 3 diferentes formas de onda (senoidal, quadrada e triangular) e oito valores de frequência (10 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz e 10 MHz) e uma amplitude de 10 V_{pp} (tensão elétrica de pico a pico).



Figura 25 Gerador de sinais utilizado neste experimento

Para a aquisição dos dados de tensão de saída (mV) do DC, utilizou-se um osciloscópio digital da marca Minipa, modelo MO-2025, LCD de 5,7 polegadas monocromático, resposta em frequência de 25 MHz com dois canais (Figura 26).



Figura 26 Osciloscópio digital utilizado neste experimento

O canal 1 foi utilizado para mensurar a tensão de entrada nos DC (fixa em $10 V_{pp}$), e por meio do canal 2 mediu-se a tensão de saída dos DC, os quais estavam inseridos em recipientes contendo solo.

3.2.1 Solos utilizados para calibração

Foram utilizados dois tipos de solos: Latossolo Vermelho Distroférico - LVd e Latossolo Vermelho Amarelo - LVA. Ambos os solos foram classificados segundo o novo sistema hierarquizado (EMBRAPA, 2006). O LVd foi coletado no campus da UFLA na camada subsuperficial (de 0,10 m a 0,20 m de profundidade). O LVA foi coletado no município de Itutinga na camada subsuperficial (de 0,10 m a 0,25 m de profundidade). Os solos foram submetidos à tamisação utilizando peneira com malha de 2 mm, em seguida, realizou-se a coleta de uma amostra composta representativa para análise física e química. Tais análises foram realizadas nos Laboratórios de Física e Fertilidade dos Solos do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. Na Tabela 4, é apresentado o resultado da análise física para classificação textural dos dois solos.

Tabela 4 Granulometria e classificação textural dos solos LVd e LVA

| Identificação | Areia | Silte | Argila | Classe Textural |
|---------------|--------|-------|--------|-----------------------|
| | dag/kg | | | |
| LVd | 8 | 22 | 70 | Muito argilosa |
| LVA | 74 | 3 | 23 | Franco argilo arenosa |

No mesmo laboratório foram determinados os pares de pontos da curva característica de retenção de água no solo e densidade do solo (ρ_{solo}), para LVd (Tabela 5).

Tabela 5 Pontos da curva característica de retenção de água no solo (LVd)

| Amostra | Tensão de água no solo (kPa) | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|-----|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 10 | 33 | 100 | 500 | 1500 |
| (0,10-0,20 m) | Umidade gravimétrica (g.g ⁻¹) | | | | | | | |
| $\rho_{\text{solo}} = 1,02 \text{ g.cm}^{-3}$ | 64,1 | 44,4 | 39,3 | 36,3 | 31,9 | 29 | 26,5 | 23,1 |

Os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo, descrita no Gráfico 1, foram obtidos com o auxílio do aplicativo *Solver* do programa Microsoft Excel®, baseados no modelo proposto por Genuchten (1980).

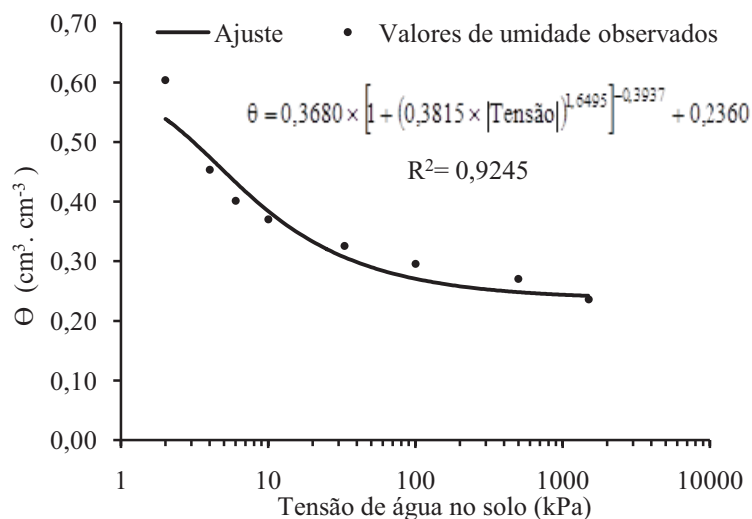


Gráfico 1 Curva característica de retenção de água no solo - LVd

Na Tabela 6, encontra-se o resultado dos parâmetros químicos do LVd.

Tabela 6 Resultado da análise química do solo LVd

| Siglas | Descrição | Unidade | Determinação |
|------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------|
| pH | pH do Solo | - | 5,6 |
| P | Fósforo | mg.dm ⁻³ | 42,28 |
| K | Potássio | mg.dm ⁻³ | 149,76 |
| Na | Sódio | mg.dm ⁻³ | - |
| Ca ²⁺ | Cálcio | cmol.dm ⁻³ | 2,70 |
| Mg ²⁺ | Magnésio | cmol.dm ⁻³ | 0,9 |
| Al | Alumínio | cmol.dm ⁻³ | 0,1 |
| H+Al | Acidez Potencial | cmol.dm ⁻³ | 3,24 |
| SB | Soma de bases | cmol.dm ⁻³ | 3,98 |
| (T) | CTC a pH 7,0 | cmolc.dm ⁻³ | 7,22 |
| t | Capacidade de troca catiônica efetiva | cmol.dm ⁻³ | 4,08 |
| Prem | Fósforo remanescente | mg.L ⁻¹ | 5,47 |
| V | Saturação de bases | % | 55,18 |
| m | Saturação por alumínio | % | 2,45 |
| MO | Matéria orgânica | dag.Kg ⁻¹ | - |
| Zn | Zinco | mg.dm ⁻³ | - |
| Fe | Ferro | mg.dm ⁻³ | - |
| Mn | Manganês | mg.dm ⁻³ | - |
| Cu | Cobre | mg.dm ⁻³ | - |
| B | Boro | mg.dm ⁻³ | - |
| S | Enxofre | mg.dm ⁻³ | - |

Na Tabela 7, encontram-se os pares de pontos da curva característica de retenção de água no solo e densidade do solo (ρ_{solo}), para LVA.

Tabela 7 Pontos da curva característica de retenção de água no solo (LVA)

| Amostra | Tensão de água no solo (kPa) | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|-----|-----|------|
| | 2 | 4 | 6 | 10 | 33 | 100 | 500 | 1500 |
| (0,10-0,25 m) | Umidade gravimétrica (g.g ⁻¹) | | | | | | | |
| $\rho_{\text{solo}} = 1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ | 33,7 | 18,6 | 14,6 | 13,4 | 10,7 | 7,9 | 6,9 | 6,3 |

Os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo, descrita no Gráfico 2, foram obtidos com o auxílio do aplicativo *Solver* do

programa Microsoft Excel[®], baseados no modelo proposto por Genuchten (1980).

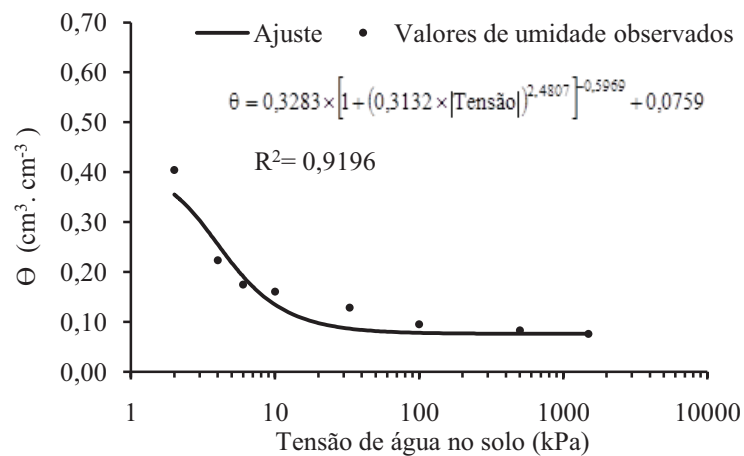


Gráfico 2 Curva característica de retenção de água no solo - LVA

Na Tabela 8, encontra-se o resultado dos parâmetros químicos do LVA.

Tabela 8 Resultado da análise química do solo LVA

| Siglas | Descrição | Unidade | Determinação |
|------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------|
| pH | pH do Solo | - | 5,0 |
| P | Fósforo | mg.dm ⁻³ | 0,8 |
| K | Potássio | mg.dm ⁻³ | 41 |
| Na | Sódio | mg.dm ⁻³ | - |
| Ca ²⁺ | Cálcio | cmol.dm ⁻³ | 0,4 |
| Mg ²⁺ | Magnésio | cmol.dm ⁻³ | 0,2 |
| Al | Alumínio | cmol.dm ⁻³ | 0,7 |
| H+Al | Acidez Potencial | cmol.dm ⁻³ | 3,6 |
| SB | Soma de bases | cmol.dm ⁻³ | 0,7 |
| (T) | CTC a pH 7,0 | cmolc.dm ⁻³ | 4,3 |
| t | Capacidade de troca catiônica efetiva | cmol.dm ⁻³ | 1,4 |
| Prem | Fósforo remanescente | mg.L ⁻¹ | 26,5 |
| V | Saturação de bases | % | 16,3 |
| m | Saturação por alumínio | % | 49,9 |
| MO | Matéria orgânica | dag.Kg ⁻¹ | 2,4 |
| Zn | Zinco | mg.dm ⁻³ | 0,6 |
| Fe | Ferro | mg.dm ⁻³ | 64,7 |
| Mn | Manganês | mg.dm ⁻³ | 5,9 |
| Cu | Cobre | mg.dm ⁻³ | 0,9 |
| B | Boro | mg.dm ⁻³ | 0,7 |
| S | Enxofre | mg.dm ⁻³ | 6,2 |

3.2.2 Correlação tensão elétrica de saída x umidade do solo

Inicialmente, em quatro recipientes de plásticos (1.000 mL), foram efetuados 45 furos com agulha metálica de 500 µm de diâmetro. Em seguida determinou-se a massa de cada um dos recipientes. Terminada essa etapa, os recipientes foram preenchidos com terra fina seca ao ar (TFSA) e determinada a massa desse conjunto (recipiente + TFSA). Após esse procedimento, as amostras foram saturadas com água destilada e homogeneizadas. Em cada recipiente foi inserido um DC (Figura 27). Os recipientes foram vedados com lona plástica para não ocorrer evaporação da água. Após um período de 48 horas, iniciaram-se as medidas de tensão elétrica de saída (mV) por meio do canal 2 do osciloscópio digital.

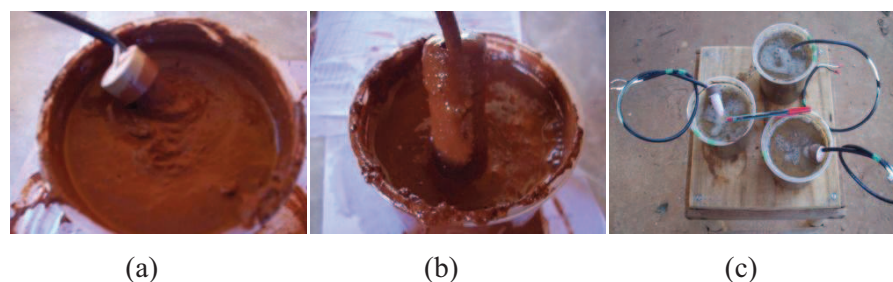


Figura 27 Dispositivos capacitivos sendo inserido na amostra de solo saturado para calibração, em que (a) e (b) refere-se ao LVd e (c) LVA

Durante a secagem, foram realizadas medições da massa úmida das amostras de solo e tensão elétrica de saída (mV) ao longo de 30 dias (Figura 28). A temperatura do solo foi registrada por meio de termopar tipo K. A faixa de temperatura das amostras de solo foi de 18 – 20 °C.



Figura 28 Unidades experimentais durante período de secagem

No final dos 30 dias, retirou-se três subamostras de cada recipiente para determinação da umidade do solo (determinada pelo método padrão de estufa) e correlacionada com os valores de tensão elétrica de saída. Vale ressaltar que, para determinação da umidade de solo, foi desconsiderada a massa do recipiente e a massa dos DC. Esse processo de calibração foi repetido durante três ciclos de

umedecimento e secagem das amostras, para as duas classes de solo supramencionadas.

3.2.3 Correlação capacitância x umidade do solo

Para determinação dessa correlação, inicialmente, foi desenvolvido um circuito RC (Resistor-Capacitor) série conforme proposto por Mohsen-Nia, Amari e Jazi (2010). Por meio desse circuito (Figura 29) estimou-se a capacitância elétrica em função da umidade do solo e frequência do sinal aplicado. Para sua construção, foi usado um resistor de $10\text{ k}\Omega$ que foi soldado no interior do cabo tipo PP de $0,75\text{ mm}^2$ e $0,30\text{ m}$ de comprimento.

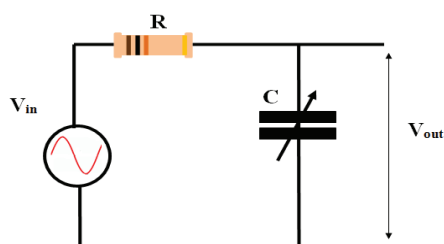


Figura 29 Circuito RC série

Nas duas extremidades do cabo, foram utilizados terminais tipo “olhal” (entrada dos sinais senoidais) e conectores do tipo “jacaré” (saída dos sinais senoidais) sendo aplicado nos DC. Na Figura 30, é apresentado o arranjo experimental para obtenção da correlação da umidade do solo e da capacitância.

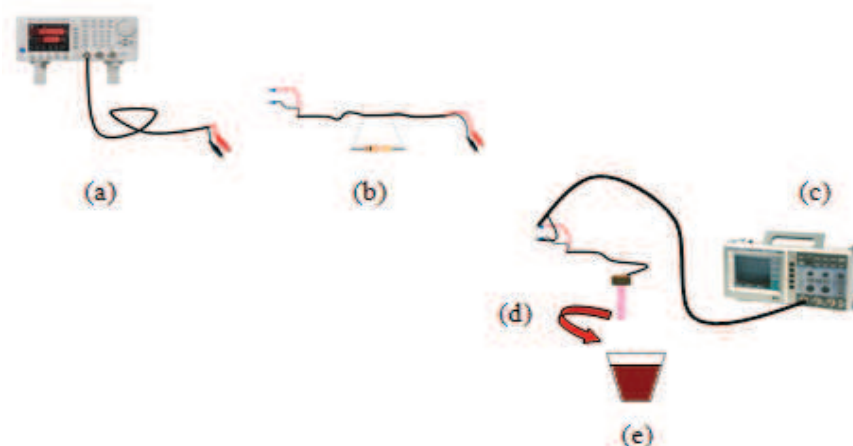


Figura 30 Arranjo experimental. Gerador de sinais (a), cabo tipo PP com resistor (b), osciloscópio digital (c), dispositivo capacitivo (d) e recipiente contendo amostra de solo (e)

Por meio dos valores de tensão eficaz de saída (mV_{rms}) advindo do DC e dos valores das frequências (Hz), estimou-se os valores da capacitância pelas equações 2 e 3.

$$C = \frac{1}{2\pi Rf} \times \left(\frac{1}{G_v^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$G_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3)$$

Em que,

C = capacitância, (Farad)

R = resistência, (Ω)

f = frequência, (Hz)

V_{out} = tensão eficaz de saída, (mV_{rms})

V_{in} = tensão eficaz de entrada, (mV_{rms})

G_v = ganho de tensão, (adimensional)

3.2.4 Avaliações

Ao longo desse experimento, foram avaliados o comportamento das grandezas elétricas (tensão elétrica de saída e capacitância) provenientes do DC quando submetido a diferentes formas de onda e o teor de água no solo para as duas classes de solo: LVd e LVA. Ajustaram-se equações correlacionando a umidade do solo com tensão eficaz de saída do DC para fins de manejo da irrigação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização química e microestrutural do bloco de gesso

No Gráfico 3, são mostrados os percentuais médios da constituição química do material dielétrico usado para fabricação dos DC. A determinação da constituição química do material cerâmico foi necessária, a fim de identificar as possíveis “impurezas” na amostra utilizada, haja vista a existência de diferentes tipos de gessos no mercado.

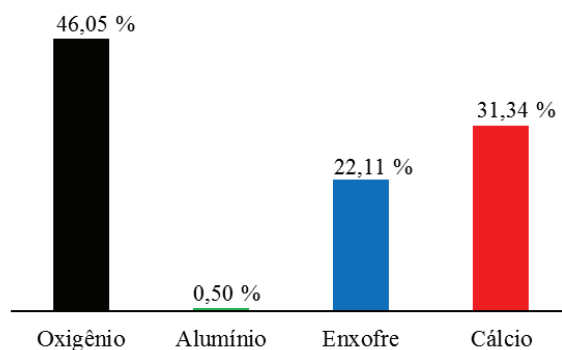


Gráfico 3 Constituição química do material dielétrico utilizado entre os eletrodos (cilindros de cobre) na construção do DC

Apesar de o bloco apresentar um pequeno percentual de alumínio, pode-se afirmar que a amostra é constituída predominantemente de sulfato de cálcio (gesso). Na Figura 31, é mostrada a característica microestrutural do bloco de gesso utilizado na construção dos DC.

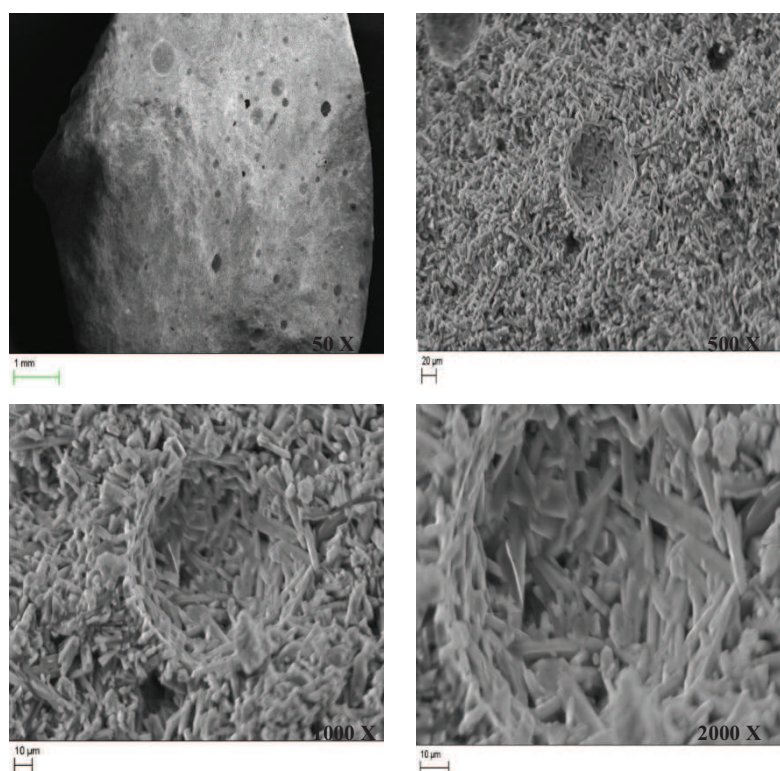


Figura 31 Caracterização microestrutural do bloco de gesso

A microestrutura observada na Figura 31 refere-se à mistura de 1 mL água destilada por 2,5 g de gesso. A amostra mostrou uma morfologia acicular dos cristais (forma de agulha) com um elevado grau de entrelaçamento, em consonância com os resultados observados no trabalho de Lazón e Ruiz (2012). De acordo com Hincapie e Cincotto (1997), o entrelaçamento desordenado dessas agulhas ocorre porque a nucleação e crescimento dos cristais, durante a hidratação, é muito rápida, sendo essa estrutura uma característica do gesso endurecido. Vale ressaltar que, a água no bloco de gesso tem comportamento distinto para diferentes relações de mistura. Persson, Wraith e Dahlin (2006), desenvolvendo sensor para determinação da tensão de água no solo com tecnologia TDR, destacam a possibilidade de variação da distribuição do

tamanho dos poros por meio da relação água/gesso. Relação de misturas menores, ou seja, mais gesso, dificulta sua colocação na forma de alumínio, pois, essa mistura fica menos fluida. Por outro lado, relação de misturas maiores ocorre decantação das partículas de gesso na parte inferior da mistura afetando a distribuição dos poros ao longo do processo de secagem, afetando inclusive, a resistência mecânica do bloco, ou seja, o bloco fica mais quebradiço.

Segundo Scanlon, Andraski e Bilskie (2002), os poros de menor tamanho da matriz do material determinam o limite inferior da faixa de medição do potencial matricial do sensor, sendo cerca de -1 MPa para blocos de gesso. Ainda de acordo com esses autores, o limite superior é controlado pela pressão de entrada de ar na matriz do sensor e, para blocos de gesso é cerca de -30 kPa, potenciais matriciais acima desse valor não podem ser medidos porque o material permanece saturado.

4.2 Correlação tensão elétrica de saída x umidade do solo

No Gráfico 4, é mostrada a tensão elétrica de entrada aplicada nos DC inseridos nas amostras do LVd e LVA. Esse sinal aplicado, praticamente não variou (amplitude e tempo - milissegundos) durante a calibração.

A onda senoidal é a forma periódica mais simples possível, ou seja, não pode ser decomposta em componentes mais simples. Jean Baptiste Joseph Fourier descobriu, no início do século XX, em seu trabalho de 1822, *La Théorie Analytique de la Chaleur* - (Teoria Analítica do Calor), que as ondas senoidais constituem os elementos fundamentais de vibrações e ondas periódicas (OLIVEIRA, 2007). Assim, para esse trabalho, optou-se por descrever o comportamento dessa forma de onda e frequência de 1 kHz, pois, está numa faixa em que a perda dielétrica, em materiais polares, é menos expressiva (ver Figura 18).

O comportamento da tensão elétrica de saída, em função da umidade e frequência do sinal, para formas de onda quadrada e triangular, para os dois tipos de solos, estão apresentadas nos Apêndices A e B respectivamente.

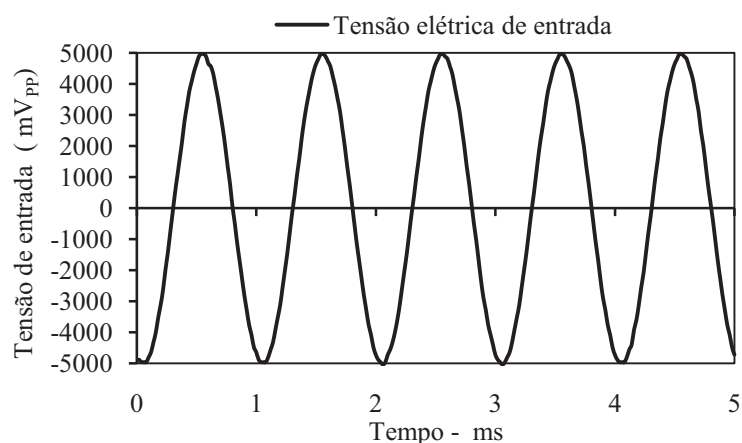
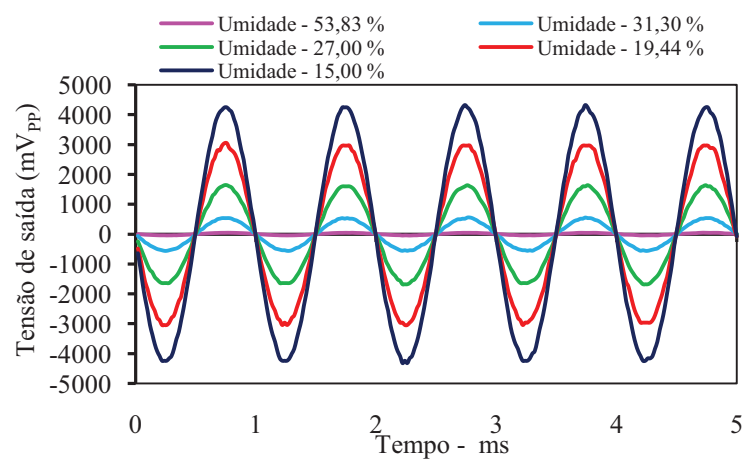
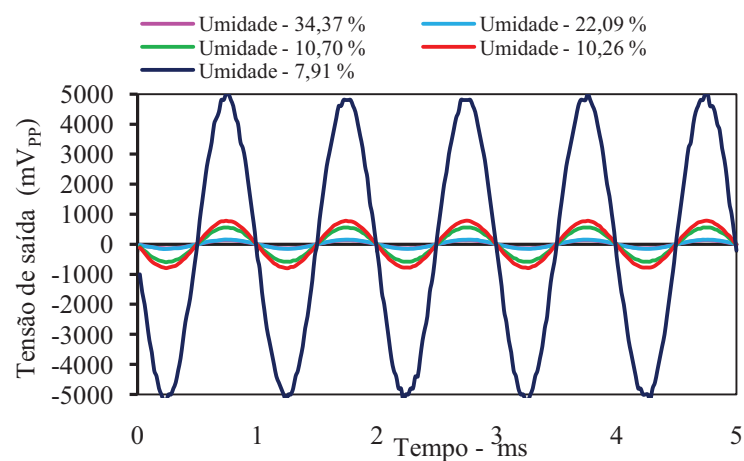


Gráfico 4 Tensão elétrica de entrada aplicada nos DC

Nos Gráficos 5a e 5b, observa-se o comportamento da tensão elétrica dos DC para os diferentes valores de umidade gravimétrica do solo. Apesar de pouco expressivo, observa-se que o sinal de saída dos DC não é uma senóide perfeita como o sinal de entrada, possivelmente em decorrência da interação com os diversos constituintes químicos presente nos solos. Pode-se confirmar que, independente do tipo de solo, a amplitude da tensão elétrica de saída demonstrou relação inversa com a umidade. Entretanto, é notória a diferença entre os sinais durante o processo de secagem do solo. As tensões elétricas de saída, dos DC inseridos no LVd, demonstraram uma variação mais gradativa quando comparado com as tensões do LVA. Tal comportamento pode estar relacionado com as diferentes características texturais desses solos, pois, em geral, solos argilosos retêm mais água quando comparados com solos de textura mais grossa.



(a)

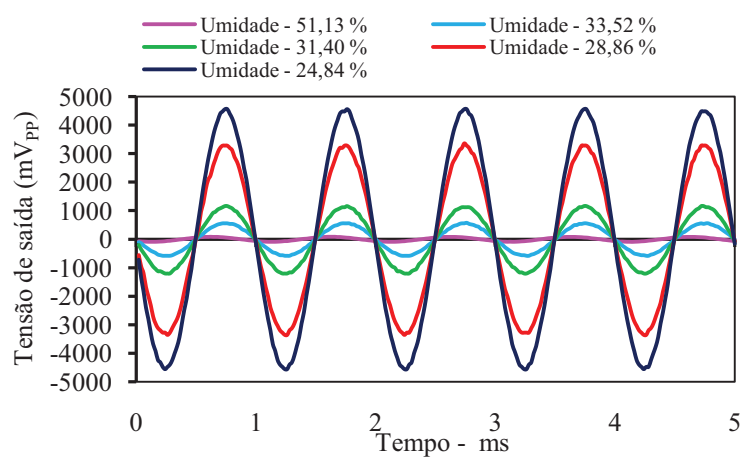


(b)

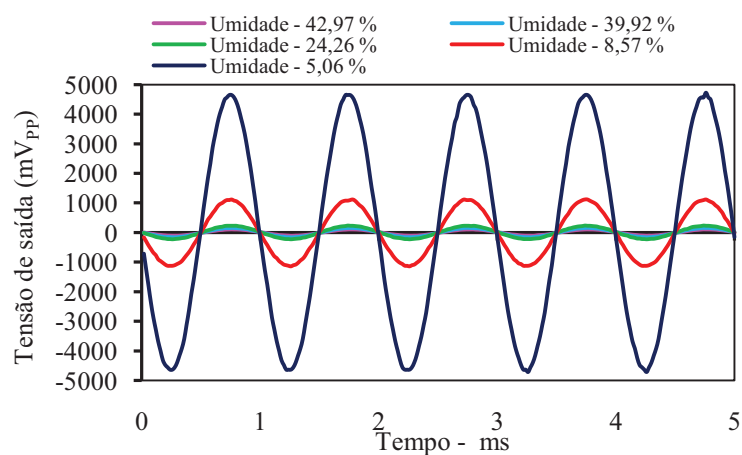
Gráfico 5 Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 1 nos solos: (a) LVd e (b) LVA

Conforme destacam Carducci et al. (2011), a dinâmica da água no solo é dependente das características intrínsecas de cada solo, resultado da ação conjunta dos atributos: textura, estrutura, mineralogia e matéria orgânica. Assim, ao trabalhar-se com certos tipos de sensores, recomenda-se determinar as características físico-hídricas do solo a fim de aumentar a capacidade preditiva das equações de calibração. Nos Gráficos 6a e 6b, é mostrado, respectivamente,

o comportamento das tensões de saída dos DC, em função da umidade gravimétrica do solo, para a amostra 2.



(a)



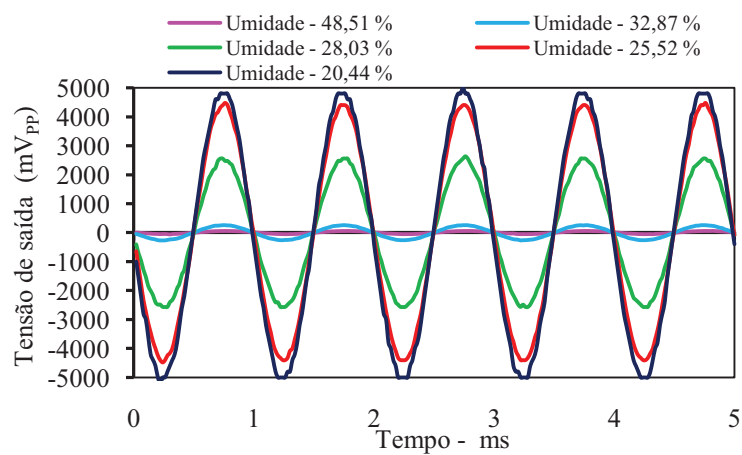
(b)

Gráfico 6 Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 2 nos solos: (a) LVd e (b) LVA

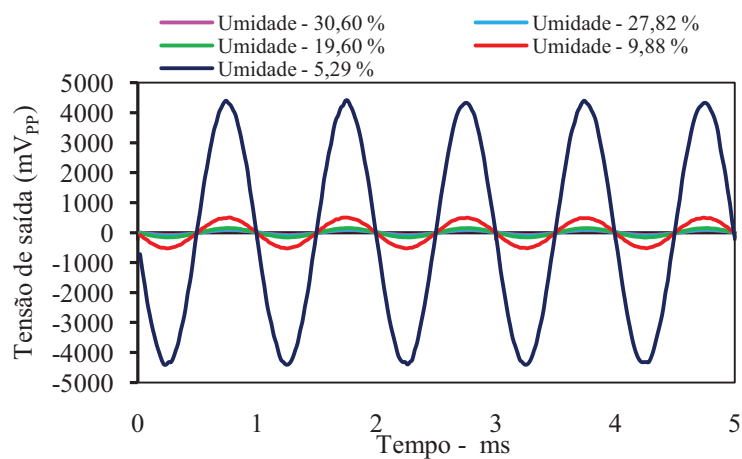
Analisando os sinais de saída dos DC, observou-se que o valor máximo de tensão de saída (mV_{pico}), da amostra 1 do LVd, apresentou uma menor variação, ou seja, para a umidade gravimétrica de 15%, a amplitude da tensão de saída deveria ser maior, sobretudo, em relação às amostras 2 e 3 que apresentam umidade gravimétrica maior. Tal comportamento pode ser atribuído a uma

variabilidade microestrutural no bloco de gesso, pois, conforme destaca Marodin (2012), a técnica de espatulação (mecânica a vácuo ou manual) afeta diretamente a homogeneidade microestrutural dos moldes de gesso, na qual, a espatulação manual apresenta maior suscetibilidade à formação de bolhas.

Nos Gráficos 7a, 7b, 8a e 8b, são mostrados, respectivamente, o comportamento das tensões de saída dos DC, em função da umidade gravimétrica do solo, para as amostras 3 e 4 dos respectivos solos.



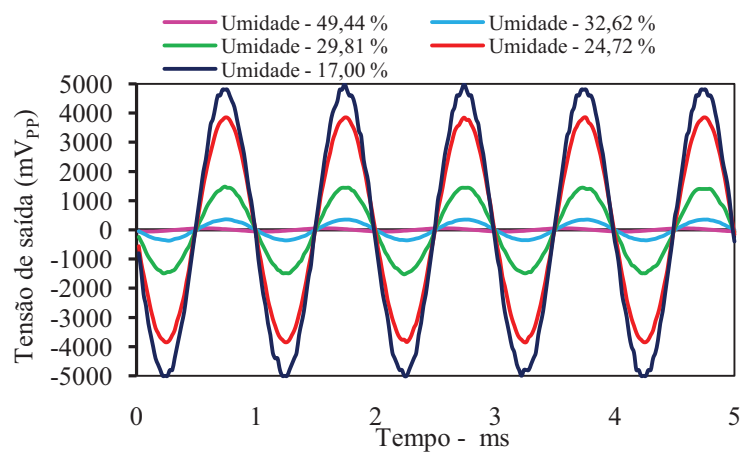
(a)



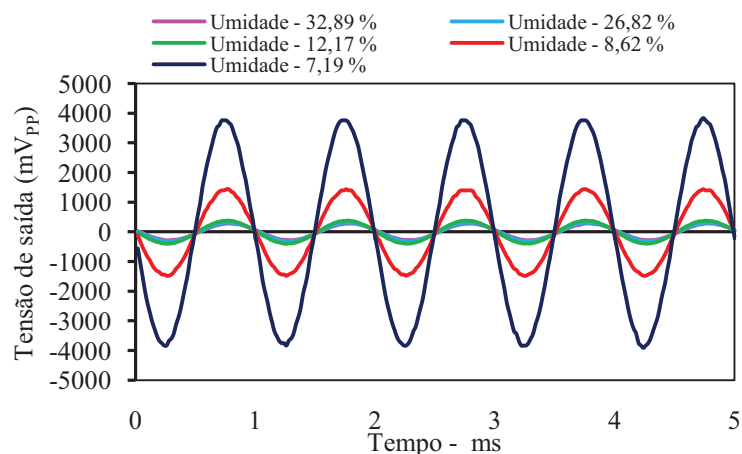
(b)

Gráfico 7 Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 3 nos solos: (a) LVd e (b) LVA

De maneira geral, pode-se afirmar que, as 4 amostras dos respectivos solos, tiveram comportamento similar em relação à variação de umidade, ou seja, quanto maior a amplitude do sinal de saída menor é a umidade do solo.



(a)



(b)

Gráfico 8 Tensão elétrica de saída observada no DC instalado na amostra 4 nos solos: (a) LVd e (b) LVA

É importante ressaltar a diferença das tensões elétricas de saída do Gráfico 9 com as dos Gráficos 5a até 8b, nos quais são mostrados as variações das amplitudes da tensão elétrica ao longo do tempo (medido por meio do osciloscópio), enquanto no Gráfico 9 é mostrado os valores de tensão elétrica eficaz (medido por meio do multímetro digital). Por definição, o valor de tensão

eficaz de uma tensão alternada periódica, é a tensão contínua que produz a mesma perda de potência média em um resistor (O'MALLEY, 1994). Em outras palavras, o valor eficaz corresponde a um valor contínuo de 70,71% do valor de pico de uma senoide.

Apesar de haver uma dispersão dos dados, nota-se que os mesmos ajustaram-se de forma satisfatória aos modelos proposto pelas equações 4 e 5, respectivamente, LVd e LVA.

$$\theta = 0,2962 + 0,0166 \times \text{LN} \left(\frac{3399,162}{V_{\text{out}} - 34,77} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\theta = 0,0209 \times \left(\frac{3263913}{V_{\text{out}} - 67,917} - 1 \right)^{0,5} + 0,0546 \quad (5)$$

Em que,

V_{out} = tensão eficaz de saída, (mV_{rms})

Θ = umidade volumétrica, (cm³ . cm⁻³)

No Gráfico 9, é apresentado um conjunto de dados observados, relacionando os valores de tensão elétrica de saída (mV_{rms}) com as respectivas umidades volumétricas do LVd e LVA. Nota-se que, para um mesmo valor de tensão de saída, o LVd demonstra reter mais água que o LVA.

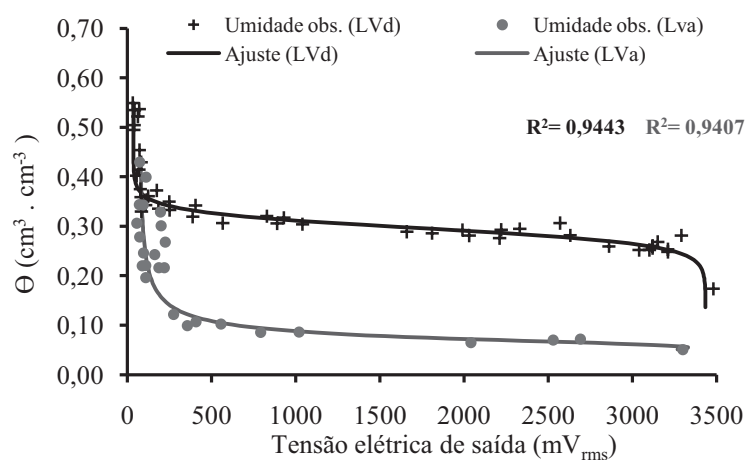
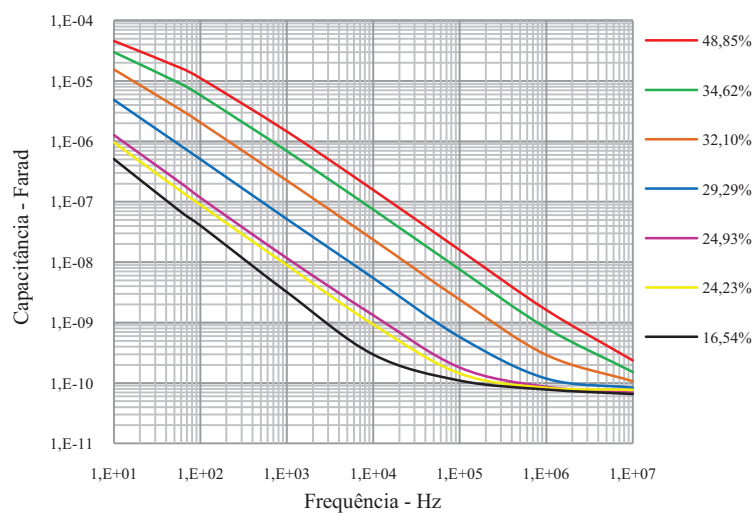


Gráfico 9 Umidade volumétrica x tensão elétrica de saída

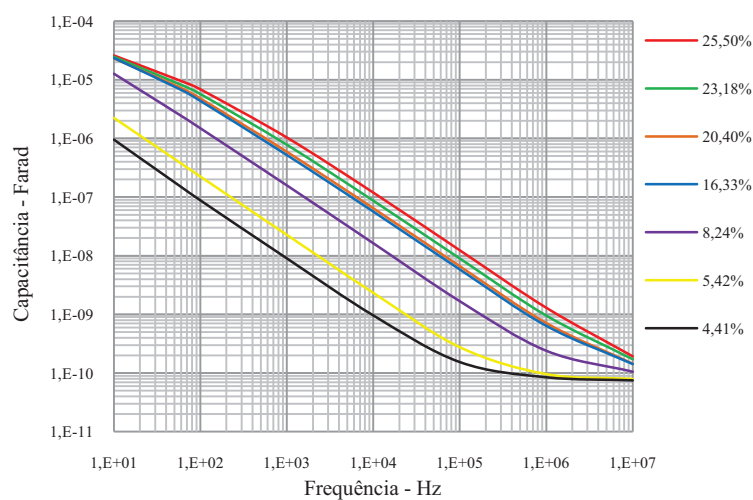
Diante deste resultado, verifica-se que os DC e o circuito RC, desenvolvidos neste trabalho, apresentam potencial para serem utilizados no manejo da irrigação.

4.3 Correlação capacitância x umidade do solo

Por meio do circuito RC série proposto na Figura 29, pôde-se estimar a capacitância elétrica em função da umidade gravimétrica e da frequência do sinal aplicado. Conforme destacam Rossato, Angelis e Alvalá (2013), no solo, a constante dielétrica, conseqüentemente a capacitância, depende da umidade, temperatura, salinidade, composição textural e da frequência medida do sensor. Convém lembrar que, a equação 2 é indicada para estimar a capacitância somente para circuitos submetidos à forma de onda senoidal. Nos Gráficos 10a e 10b, é mostrado o comportamento da capacitância elétrica da amostra 1 para os dois tipos de solos, nos quais diferentes DC foram inseridos.



(a)



(b)

Gráfico 10 Capacitância estimada para diferentes valores de umidades do solo e frequência do sinal: (a) LVd e (b) LVA (amostra 1)

Ao longo da última década, o comportamento elétrico dos materiais dielétricos tem sido objeto de pesquisas em decorrência dos bons resultados obtidos, sobretudo, em ensaios não destrutivos em que a determinação do teor de

água no interior de vários produtos e materiais se faz necessário. Rusiniak (2002), estudando o comportamento dielétrico da água em blocos de gesso (Gráfico 11), na faixa de frequência de 5 a 13 MHz, destaca a influência da quantidade de água nas amostras de blocos de gesso, nos valores de capacitância.

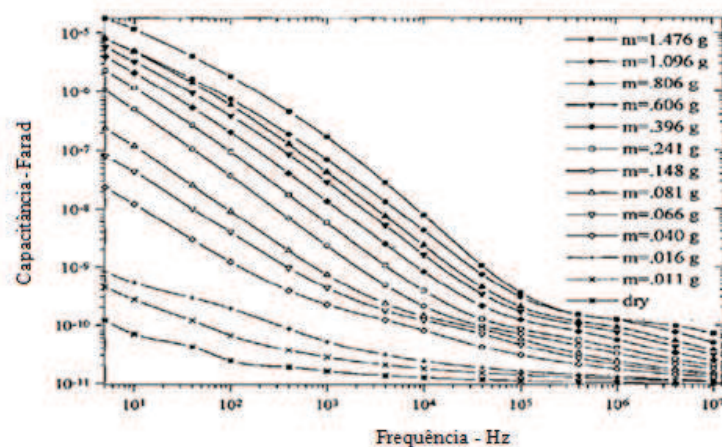


Gráfico 11 Capacitância medida com célula de gesso, com diferentes valores de massa de água, em função da frequência

Fonte: Adaptado de Rusiniak (2002)

Analisando o Gráfico 11, nota-se que para um mesmo valor de frequência, a capacitância é maior nas amostras contendo mais água. Esta tendência foi verificada nos gráficos, onde os DC foram utilizados como elementos sensores. Golnabi e Sharifian (2013), investigando os parâmetros elétricos da água, dentre eles a capacitância, mostram que o valor de tal grandeza diminui com o aumento da frequência. Por meio de sensores capacitivos cilíndricos e medidor de impedância RLC (R = resistência, L = indutância e C = capacitância), os autores avaliaram o comportamento da capacitância (Gráfico 12) para 4 diferentes amostras de água submetidas a uma

temperatura de 20 °C: (DW = água destilada, MW = água mineral, TW = água de torneira e SW = água salgada).

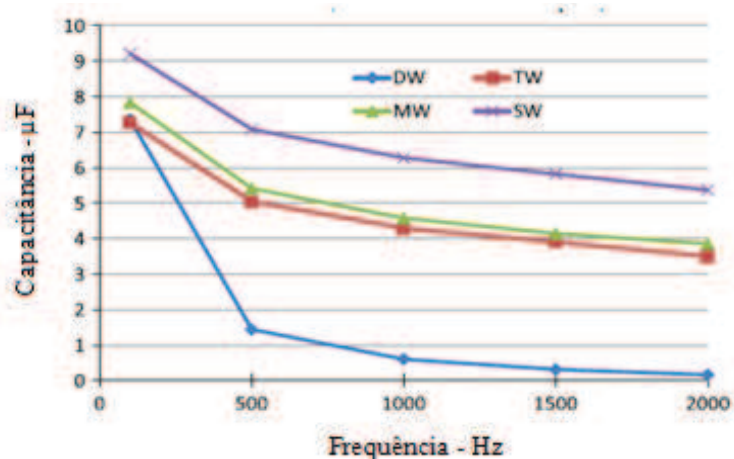
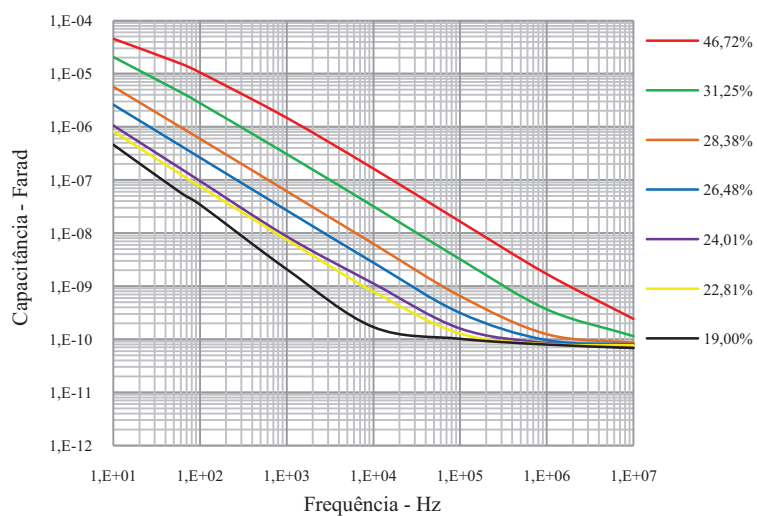
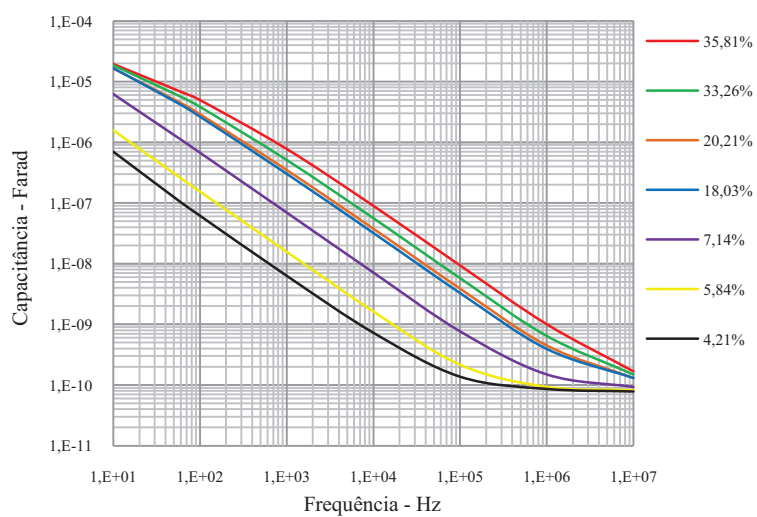


Gráfico 12 Capacitância elétrica medida em função da frequência
Fonte: Adaptado de Golnabi e Sharifian (2013)

Nos Gráficos 13a e 13b, é mostrado o comportamento da capacitância elétrica da amostra 2. Interessante observar também que, a variação da capacitância no LVD ocorreu de maneira gradual quando comparado com o LVA. De maneira geral, solos com percentuais maiores de areia retêm menos água, tal fato pode explicar o comportamento da capacitância observado nos gráficos das três amostras de solo, onde os DC estavam inseridos.



(a)

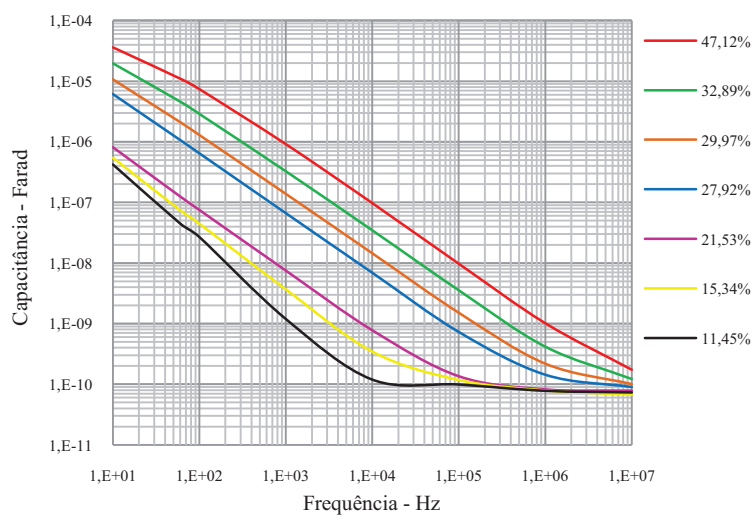


(b)

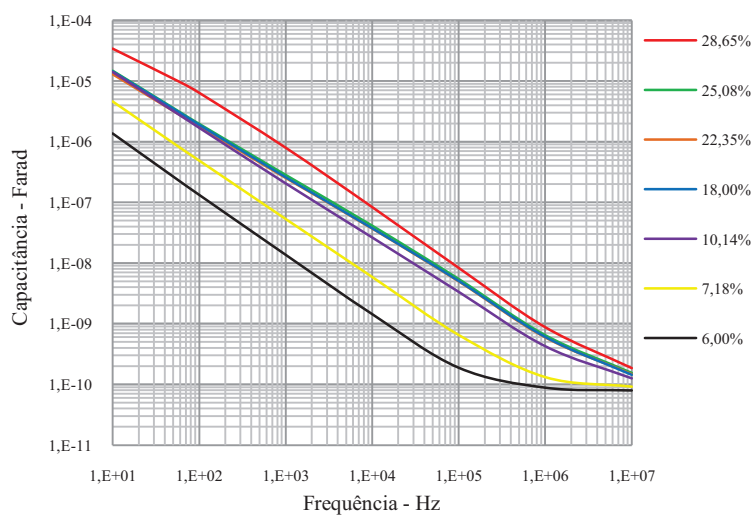
Gráfico 13 Capacitância estimada, para diferentes valores de umidades do solo e frequência do sinal: (a) LVd e (b) LVA (amostra 2)

Trabalho realizado por Gardner, Dean e Cooper (1998) no Instituto de Hidrologia do Reino Unido demonstra que, a técnica para determinar a constante dielétrica do solo, conseqüentemente a capacitância, é claramente um método

eficaz e, por conseguinte, pode ser utilizado para medir a umidade do solo de forma rotineira. Entretanto, destacam os autores que é necessário que a calibração dos sensores capacitivos seja efetuada para cada tipo de solo. Nos Gráficos 14a e 14b, é mostrado o comportamento da capacitância elétrica da amostra 3. Verifica-se que, nas três amostras de solo os valores de capacitância tiveram a mesma tendência, ou seja, menos água e maiores frequências implicam em valores mais baixos de capacitância.



(a)



(b)

Gráfico 14 Capacitância estimada, para diferentes valores de umidades do solo e frequência do sinal: (a) LVd e (b) LVA (amostra 3)

Conforme já discutido, os valores de capacitância elétrica nos sensores capacitivos são fortemente dependentes da quantidade de água e da frequência do sinal aplicado. Tal fenômeno é devido aos processos de polarização das

moléculas de água. Benedetto (2010), avaliando a técnica GPR (Ground Penetration Radar) para determinar a umidade do solo, ressalta o efeito da frequência no processo de polarização da molécula de água.

5 CONCLUSÕES

- a) Depreende-se que, independente do solo utilizado, a tensão elétrica advinda dos dispositivos capacitivos, demonstrou relação inversa com a umidade do solo, ou seja, quanto maior a amplitude da tensão elétrica de saída menor a umidade do solo;
- b) O comportamento da capacitância elétrica variou de maneira expressiva em função da umidade do solo e da frequência do sinal aplicado. Observou-se que, independente da forma de onda (senoidal, triangular ou quadrada) a presença das moléculas d'água entre os eletrodos de cobre do dispositivo aumenta a capacitância e diminui com o aumento da frequência;
- c) A variação da capacitância elétrica ocorreu de maneira mais gradual no solo com maior percentual de argila, possivelmente, em decorrência da maior interação das moléculas d'água (momento dipolo permanente) com as cargas negativas das argilas;
- d) O circuito RC série e o dispositivo capacitivo, desenvolvidos neste trabalho, apresentam potencial para mensurar a umidade do solo, e por meio da curva característica de retenção de água no solo estimar a tensão de água no solo.

REFERÊNCIAS

- ABULQUERQUE, P. E. P. Estratégias de manejo de irrigação. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, 2008. p. 451-486.
- AGGESTAM, V. **Irrigation management in conventional and organic potato production**: a case study on the East Anglia region UK, working towards a sustainable future. 2008. p. 37. Thesis (Master's Thesis - Environmental Science and Sustainability) - Lunds Universitet, Sweden, 2008.
- 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, Jan. 1942.
- BELTRÁN, J. M. Integrated approach to address salinity problems in irrigated agriculture. In: INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM SALINIDADE. **Manejo da salinidade na agricultura**: estudos básicos e aplicados. Fortaleza, 2010. p. 3-8.
- 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, 2009. 204 p.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2012. Brasília, 2012a. 215 p. (Edição Especial).
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: 2013. Brasília, 2013a. 432 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Intercâmbio comercial do agronegócio**: principais mercados de destino. Brasília: MAPA/ACS, 2012b. 456 p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Relatório final: In: SEMINÁRIO NACIONAL DE AGRICULTURA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE ATIVIDADES, 2., 2013, Brasília. **Relatório...** Brasília, 2013b. 68 p.

BUSATO, C. C. M. et al. Chuva sob medida. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 10, n. 120, p. 16-22, jul. 2012.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 820 p.

CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 1 p. 77-86, 2011.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa, MG: UFV, 2012. 239 p.

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. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 22, n. 1, p.115-127, jan./mar. 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2012/2013, décimo levantamento, julho 2013**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 17 jul. 2013.

CONTINI, E.; PENA JÚNIOR, M.; VIEIRA, P. A. Seca norte-americana: preços agrícolas e implicações para o Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 85-97, jan./mar. 2013.

COSTA, E. L. et al. Métodos e sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 7-16, nov./dez. 2010.

CUNHA, A. S. Os 150 anos do MAPA. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 19, p. 4-8, jul. 2010. (Edição Especial – 150 anos).

DOBRIYAL, P. et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 458-459, n. 21, p. 110-117, Aug. 2012.

EL MARAZKY, M. S. A.; MOHAMMAN, F. S.; AL-GHOBARI, H. M. Evaluation of soil moisture sensors under intelligent irrigation systems for economical crops in arid regions. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, New York, v. 6, n. 2, p. 287-300, June 2011.

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.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. L. **The Feynman lectures on physics: mainly electromagnetism and matter**. New millennium. New York: Basic Books, v. 2, 2010.

FOLEGATTI, M. V. et al. Agricultura irrigada no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 94-100, nov./dez. 2010.

FRAGNITO, H. L. (Coord.). **Circuitos de corrente alternada**. Campinas: Unicamp. Instituto de Física Gleb Wataghin, 2010. 83 p. (Notas de Física Experimental).

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. **Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo alternativo para estimativa da umidade do solo**. 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

FREITAS, W. A. et al. Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 268-274, mar. 2012.

GANJI, A.; SHEKARRIZFARD, M. A simple model of fuzzy irrigation depth control: an application of an intelligent state dropping (ISD) mechanism. **Journal Irrigation and Drainage**, New Jersey, v. 61, n. 5, p. 506-603, Oct. 2012.

GARDNER, C. M. K.; DEAN, T. J.; COOPER, J. D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 71, n. 4, p. 395-403, Dec. 1998.

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.

GOLNABI, H.; SHARIFIAN, M. Investigation of water electrical parameters as a function of measurement frequency using cylindrical capacitive sensors. **Journal of the International Measurement Confederation**, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 305-314, Jan. 2013.

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

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Amsterdam/Boston: Elsevier Academic, 2004. p. 494.

HINCAPIE, M. A.; CINCOTTO, M. A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 7-16, jul./dez. 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE**: estatística da produção agrícola. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201306.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2013.

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. 30p.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Livraria Nobel, 1984.

KUMHALA, F.; VÁCLAV, P.; BLAHOVEC, J. Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. **Biosystems Engineering**, London, v. 102, n. 1, p. 36-43, Jan. 2009.

LAZÓN, M.; RUIZ, P. A. G. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters. **Journal Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 506-511, Mar. 2012.

- MADAIL, J. C. M. et al. **Viabilidade econômica da técnica de irrigação por gotejamento em pomares de pessegueiro na Região Sul do RS:** estudo de caso. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. p. 7. (Comunicado Técnico, 185).
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação:** princípios e métodos. 2. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2007. 358 p.
- MARODIN, A. L. **Gessos odontológicos:** avaliação da resistência à compressão e da morfologia ao microscópio eletrônico de varredura, em relação à técnica de spatulação. 2012. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Odontologia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- MARTÍ, P.; GASQUE, M.; ALTOZANO, P. G. An artificial neural network approach to the estimation of stem water potential from frequency domain reflectometry soil moisture measurements and meteorological data. **Journal of Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 91, n. 1, p. 75-86, Feb. 2013.
- MITTELBACH, H.; LEHNER, I.; SENEVIRATNE, S. I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 430-431, n. 2, p. 39-49, Apr. 2012.
- MOHSEN-NIA, M.; AMARI, H.; JAZI, B. 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.
- MUKHERJI, A. et al. **Revitalizing Asia's irrigation:** to sustainably meet tomorrow's food needs. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute/Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009.
- NOLZ, R.; KAMMERER, G.; CEPUDER, P. Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. **Journal of Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 116, n. 1, p. 12-20, Jan. 2013.
- OLIVEIRA, H. M. **Análise de sinais para engenheiros:** uma abordagem via Wavelets. Rio de Janeiro: Brasport, 2007. 268 p.
- OLIVEIRA, R. M. **Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmicas porosas de ZrO₂-TiO₂ para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos.** 2010. 176 p. Tese (Doutorado em Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

- O'MALLEY, J. **Análise de circuitos**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1994. 679 p.
- PERSSON, M.; WRAITH, J. M.; DAHLIN, T. 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, June 2006.
- PLATER, C.V. A portable capacitance: type soil moisture meter. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 80, n. 5, p. 391-396, Nov. 1955.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012. 500 p.
- RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed.). Manejo de irrigação. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p. 265-302.
- RIVERA, D. et al. A methodology to identify representative configurations of sensors for monitoring soil moisture. **Journal Environmental Monitoring and Assessment**, New York, v. 184, n. 11, p. 6563-6574, Nov. 2012.
- ROBERT, R.; KOWALSKI, R. L.; GOMES, D. M. Corrente de absorção e reabsorção em dielétricos. **Revista Brasileira de Ensino Física**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 3307.1-3307.9, jul./set. 2008.
- ROSSATO, L.; ANGELIS, C. F.; ALVALÁ, R. C. S. Impacto das características da superfície terrestre no algoritmo de inferência da umidade do solo no Brasil, utilizando observações do Sensor AMSR-E/Aqua. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 137-156, out./dez. 2013.
- RUSINIAC, L. Spontaneous polarization of water in porous structure of a solid body. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 148, n. 2, p. 313-319, July 2002.
- SATURNINO, H. M. et al. Agricultura irrigada: oportunidades e desafios. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 101-109, nov./dez. 2010.
- SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.).

Methods of soil analysis: part 4, physical methods: Soil Science Society of America, Texas, 2002. n. 5, p. 643–670.

SENEVIRATNE, S. I. et al. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review. **Journal Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 99, n. 3-4, p. 125-161, Feb. 2010.

VLACK, L. H.V. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. São Paulo: E. Blücher/EDUSP, 1973. 318 p.

VELLIDIS, G. et al. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Journal of Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 61, n. 1, p. 44-50, Apr. 2008.

WEBSTER, J. G. (Ed.). **The measurement, instrumentation, and sensors handbook: handbook**. Boca Raton: CRC, 1999. v. 2.

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

YAKUBOV, M. Assessing irrigation performance from the farmers' perspective: a qualitative study. **Journal Irrigation and Drainage**, New Jersey, v. 61, n. 5, p. 316-329, July 2012.

CAPÍTULO 2 Comparação de dispositivo capacitivo e tensiômetro, para monitoramento da umidade do solo

RESUMO

A adoção de critérios técnico-agronômicos para realização do cultivo adequado dos vegetais passa a ter relevância, sobretudo, no tocante a uma maior rentabilidade e racionalização do uso da água e nutrientes. Neste contexto, informações acerca do teor de água no solo existente na zona radicular ou sobre a energia com que a água está retida no solo, têm sido uma das estratégias fundamentais para determinar o momento de irrigar, principalmente, nos cultivos das hortaliças, que são mais sensíveis à falta de água. Diante do exposto, propôs-se, neste trabalho, a utilização e avaliação dos Dispositivos Capacitivos (DC) para estimar a umidade do solo em comparação com Tensiômetros (TS) durante o cultivo da alface romana. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 3, sendo dois dispositivos (DC e TS) e três valores de tensão de água no solo (15 kPa, 30 kPa, 60 kPa) e quatro repetições, totalizando vinte e quatro parcelas experimentais. Observou-se que, o manejo da irrigação utilizando os DC proporcionou a mesma produção da alface romana que àquela proporcionada pelo manejo utilizando o tensiômetro, na qual a tensão de 15 kPa foi a mais adequada. Os parâmetros: volume de água aplicado, eficiência de uso da água e teor de clorofila foram, estatisticamente, não significativos. Depreende-se que, o uso da tensão elétrica de saída dos dispositivos capacitivos, pode ser utilizado como um parâmetro para estimar a umidade do solo.

Palavras chave: Tensiometria. Tensão elétrica. Alface romana.

ABSTRACT

The adoption of technical and agronomic criteria to achieve the proper cultivation of the plant is relevant, especially with regard to greater profitability and rational use of water and nutrients. In this context, information about the water content in the existing soil in the root zone, or the energy with which water is retained in the soil, have been fundamental strategies to determine when to irrigate, especially in crops of vegetables, which are more sensitive to lack of water. Given the above, the proposition of this paper is the use and evaluation of the Capacitive Devices (CD) to estimate soil moisture compared with Tensiometers (TS) during cultivation of romaine lettuce. The experimental design used was a completely randomized factorial 2 x 3 with two devices (CD and TS) and three values of soil water tension (15 kPa, 30 kPa, 60 kPa) and four replications, totaling twenty four experimental plots. It was observed that the irrigation management using the CD provided the same production of romaine lettuce to that provided by the management using the tensiometer, in which the voltage of 15 kPa is more suitable. The parameters (volume of water applied, water use efficiency and chlorophyll content) were not statistically significant. It appeared that the use of electric tension output of capacitive devices could be used as a parameter for estimating soil moisture.

Keywords: Tensiometry. Electric tension. Romaine lettuce.

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual da atividade agrícola, a produtividade e qualidade dos produtos vegetais são fatores determinantes para que o produtor rural mantenha-se no mercado. Sendo assim, a adoção de critérios técnico-agronômicos para realização do cultivo adequado dos vegetais, passa a ter relevância, sobretudo, no tocante a uma maior rentabilidade e racionalização do uso da água e nutrientes.

O emprego das técnicas de irrigação na agricultura brasileira tem crescido substancialmente, motivado pelos resultados positivos que propiciam incremento de produtividade, melhoria na qualidade dos produtos e possibilidade de oferecer produtos na entressafra. Pesquisas têm evidenciado que o manejo adequado dos sistemas de irrigação, é necessário não apenas para suprir as demandas hídricas das plantas, mas também, para minimizar gastos desnecessários com água e energia elétrica. Assim, informações acerca do teor de água no solo existente na zona radicular ou sobre a energia com que a água está retida no solo, têm sido uma das estratégias fundamentais para determinar o momento de irrigar, sobretudo, nos cultivos das hortaliças que são mais sensíveis à falta de água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O aumento da área irrigada nos últimos anos, no Brasil, reflete o reconhecimento dos produtores rurais sobre a importância da irrigação no processo produtivo. Uma vez instalado o sistema de irrigação, o produtor rural precisa de uma estratégia de manejo da água de irrigação a fim de definir o momento e a quantidade adequada para suprir as necessidades hídricas da cultura. A estimativa da umidade do solo ou tensão de água no solo pode ser feita por vários métodos e instrumentos. Dentre esses, menciona-se o tensiômetro, o qual foi desenvolvido no início do século 20 (MAROUELLI et al., 2011). De acordo com esses autores, o uso dos tensiômetros é recomendado para o manejo de água da maioria das culturas. Pires et al. (2013), avaliando a produção do meloeiro submetido a diferentes manejos de água com o uso de manta de tecido, concluíram que, o manejo de água utilizando tensiômetros favoreceu o melhor desenvolvimento das plantas, resultando em frutos mais pesados em relação ao método baseado na leitura do Tanque Classe A. Bandeira et al. (2011), estudando o desenvolvimento de duas cultivares de alface submetidas a dois métodos de manejo de irrigação, no município de Juazeiro – BA, demonstrou que, o manejo de água de irrigação, por meio de tensiômetros, promoveu melhores resultados em todas as variáveis analisadas quando comparado com o manejo utilizando tanque de evaporação reduzido. Conforme se observa o manejo adequado da água de irrigação, tem proporcionado bons resultados de produtividade e qualidade das hortaliças. De fato, o emprego da irrigação na horticultura tem crescido consideravelmente no Brasil. Vale ressaltar que, por apresentarem sistema radicular pouco profundo e ciclo vegetativo curto, as hortaliças são bastante exigentes em água e a ocorrência de déficit hídrico pode comprometer a produtividade de maneira significativa.

Dentre as hortaliças, a alface (*Lactuca sativa* L.) está, mundialmente, entre as folhosas mais consumidas. A alface é uma planta herbácea, com caule diminuto, não ramificado ao qual se prendem as folhas que são relativamente grandes, podendo ser lisa ou crespa, fechando-se ou não a “cabeça” (SILVA et al., 2000). Pertencente à família *Asteraceae* é uma planta originária de espécies silvestres ainda encontradas em regiões de clima temperado, no sul da Europa e na Ásia Ocidental (FILGUEIRA, 2000).

Os cultivares existentes no mercado podem ser agrupados em função das características das folhas e a formação ou não das “cabeças”, subdividindo-as em seis grupos: Repolhuda-Manteiga, Repolhuda-Crespa, Solta-Lisa, Solta-Crespa, Mimosa e Romana. De acordo com Sánchez et al. (2011) e Zhan et al. (2012), a alface romana é uma das favoritas dos consumidores devido ao seu aroma, à textura crocante, à aparência, bem como ao seu elevado teor de compostos fenólicos. Nos Estados Unidos da América, a produção de alface romana, no ano de 2010 foi de 11.180 toneladas (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA, 2011). No Brasil, as maiores áreas de cultivo são de cultivares dos tipos crespa e lisa. Entretanto, a alface romana vem despertando interesse nos produtores devido à aparência diferenciada e maior interesse ao processamento (MACIEIRA, 2011). Segundo o mesmo autor, são escassas as informações sobre épocas e regiões de cultivo de alface romana. Para Almeida (2012), em relação ao consumo hídrico, a alface é uma cultura exigente em água. Para Luna et al. (2013), a água é o fator limitante mais dominante para a produção de alface. Conforme destacam Silva et al. (2000), em geral, as hortaliças folhosas devem ser irrigadas até a colheita, pois, as plantas são bastante suscetíveis à deficiência de água.

De acordo com Marouelli e Sousa (2011), as hortaliças são espécies vegetais de alto valor econômico, caracterizadas pelo alto custo de produção, mas que possibilitam incrementos consideráveis de produção e de receita líquida

quando exploradas de forma tecnificada e intensiva, com fornecimento de água e nutrientes. Apesar dos benefícios mencionados, acerca do manejo da irrigação, sabe-se que, em quase todo território brasileiro, é reduzida a frequência e fortes são as resistências ao uso de qualquer método de manejo racional da água de irrigação. Para Marouelli et al. (2011) o baixo índice de adoção dessas tecnologias deve-se ao fato de os produtores acreditarem que são caras, complexas, trabalhosas e não proporcionam ganhos econômicos compensadores. Diante do exposto, propôs-se neste trabalho, a utilização e avaliação do Dispositivo Capacitivo (DC) para estimar a umidade do solo, em comparação com tensiômetros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do tipo arco, próximo ao laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras - MG, no período de dezembro de 2012 a janeiro de 2013. A casa de vegetação está localizada nas seguintes coordenadas geográficas: 21° 13' 4'' de latitude Sul e 44° 54' 26'' de longitude Oeste e altitude de 817 metros. Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta um clima Cwa, ou seja, clima temperado suave, chuvoso, com inverno seco (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007). Os registros da temperatura e da umidade relativa foram realizados com o auxílio de um termohigrômetro digital modelo HT-600 da Instrutherm.

O solo utilizado neste experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico segundo o 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 mm. As análises físicas e químicas do solo foram realizadas no Departamento de Ciência do Solo da UFLA e estão representadas nas Tabelas 3 e 5 (ver Capítulo 1). O modelo matemático utilizado para descrição da curva de retenção do LVd é descrito pelo Gráfico 1 do Capítulo 1. A adubação de pré-plantio, preparo do solo e montagem do sistema de irrigação tiveram início no dia 17/11/2012. O transplante foi realizado no verão, no dia 17/12/2013 e a colheita no dia 21/01/2013, totalizando 35 dias.

3.1 Adubação

Diante dos resultados da análise química do solo, verificou-se que o pH estava dentro da faixa aceitável para a cultura da alface, não havendo a necessidade de calagem. A adubação com micronutrientes (boro, zinco, molibdênio, cobre), fósforo e 20 % de nitrogênio ocorreu 30 dias antes do transplante (Tabela 1). Inicialmente os fertilizantes foram misturados ao solo de maneira homogênea para posterior enchimento dos vasos.

Tabela 1 Fertilizantes e doses utilizadas na adubação da alface romana

| Fertilizante | Nutriente | Dose (gramas/vaso) |
|---|-----------|--------------------|
| Sulfato de Zinco (22% de Z) | Z | 1,250 |
| Ácido Bórico (17% de B) | B | 0,800 |
| Ureia (45% de N) | N | 0,950 |
| MAP (60% de P ₂ O ₅) | P | 0,464 |
| Sulfato de Cobre (25% Cu) | Cu | 0,840 |
| Molibdato de Amônio (54%Mo) | Mo | 0,042 |

3.2 Teor de clorofila total

O teor de clorofila total (C_{LT}) foi determinado mediante metodologia convencional com o uso de Espectrofotômetro de Fluorescência (Figura 1a), segundo método descrito por Arnon (1949), usando como extrator a acetona 80% (Figura 1b).

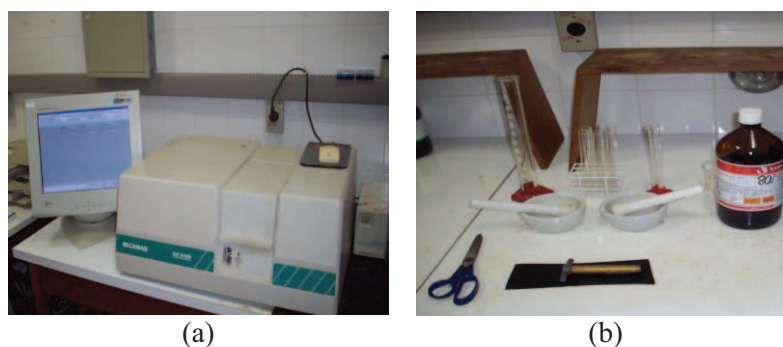


Figura 1 Espectrofotômetro Beckman DU – 640B (a), aparato experimental utilizado no preparo das amostras (b) para determinação do teor de clorofila

3.3 Construção e instalação dos tensiômetros

Os tensiômetros (TS) utilizados neste experimento foram construídos e testados no Laboratório de Hidráulica do DEG. Foram utilizados tubos de PVC branco de 12 mm de diâmetro, 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, foram colocados dentro de um reservatório contendo água e submetidos a uma pressão interna de 150 kPa por meio de um compressor. Tal procedimento teve como objetivo identificar possíveis vazamentos. Efetuado o teste, as cápsulas dos tensiômetros permaneceram imersas em água. Posteriormente, foram instalados nos vasos de polietileno com capacidade de 5,20 L (Figura 2) a uma profundidade de 0,12 m. Para evitar perda de solo, uma tela de sombrite foi instalada no fundo do vaso.

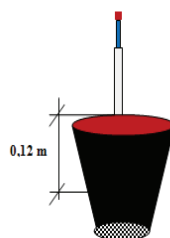


Figura 2 Representação esquemática da instalação dos tensiômetros

3.4 Delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×3 , sendo dois dispositivos (DC e TS) e três valores de tensão de água no solo (15 kPa, 30 kPa, 60 kPa) e quatro repetições, totalizando 24 parcelas experimentais (Figura 3).

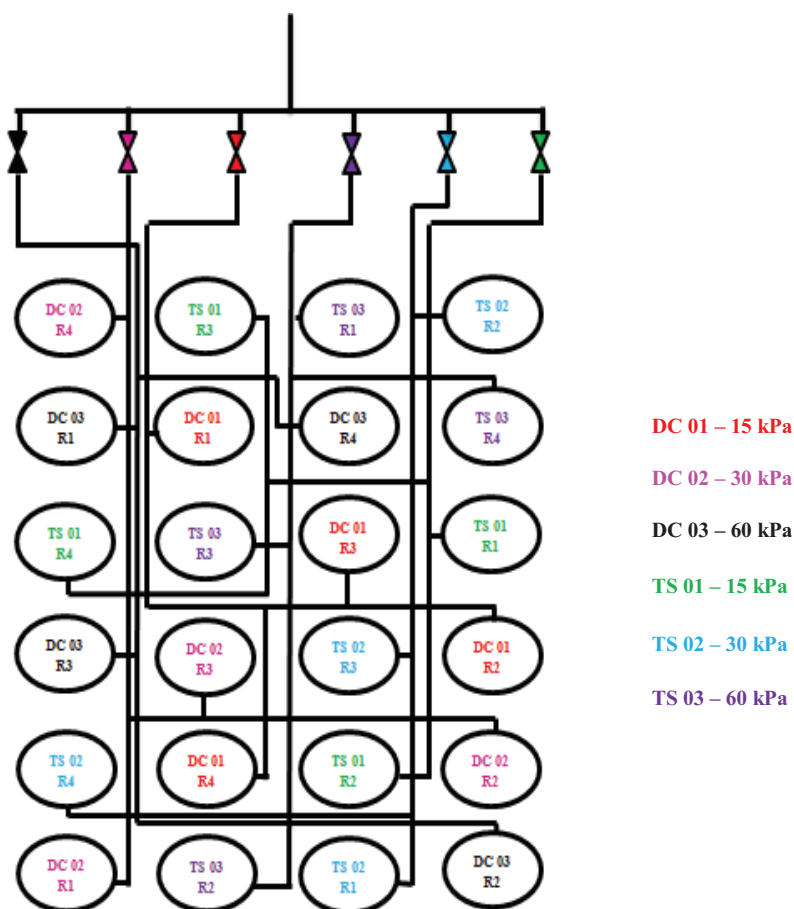


Figura 3 Croqui da área experimental

3.5 Sistema de irrigação

Adotou-se o sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes, com vazão de $4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. 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 0,50 m de comprimento. Após a montagem do sistema de irrigação, realizou-se a avaliação da uniformidade de vazão através da equação (1).

$$CU = \left(\frac{q_{25\%}}{q_{m\u00e9dia}} \right) \quad (1)$$

Em que:

CU = Coeficiente de uniformidade da vaz\u00e3o, decimal;

$q_{25\%}$ = m\u00e9dia de 25% das menores vaz\u00f5es, $L.h^{-1}$;

$q_{m\u00e9dia}$ = vaz\u00e3o m\u00e9dia geral, $L.h^{-1}$.

Para este experimento, o CU foi de 0,9572. Este resultado est\u00e1 de acordo com os valores recomendados pela Associa\u00e7\u00e3o Brasileira de Normas T\u00e9cnicas – ABNT (1986).

3.6 Instala\u00e7\u00e3o do experimento

Os vasos com as plantas foram dispostos em 4 fileiras, contendo cada uma 6 vasos, num total de 24 vasos (Figura 4). Os vasos foram colocados em cima de t\u00e1buas que estavam apoiadas por uma estrutura met\u00e1lica.

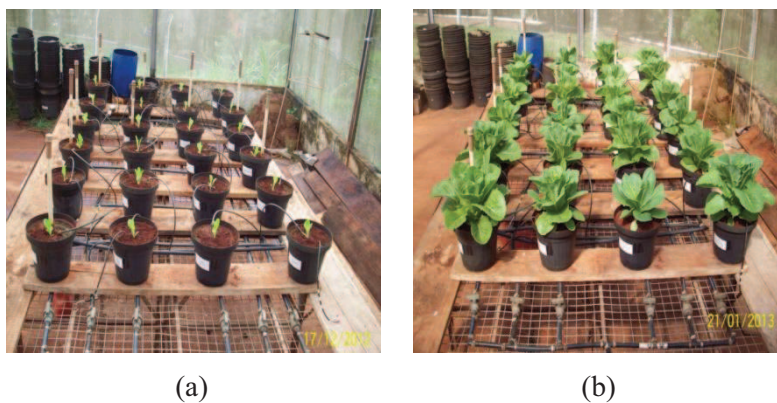


Figura 4 \u00c1rea experimental. In\u00edcio (a) e t\u00e9rmino aos 35 DAT (b)

3.7 Transplântio e manejo inicial

Após a distribuição dos vasos, montagem e teste do sistema de irrigação, as plantas foram transplantadas, com o solo na capacidade de campo, uma planta em cada vaso. Em todas as parcelas experimentais, foi aplicado o mesmo volume de água, correspondente à capacidade de campo até os 9 DAT (dias após o transplântio). A partir dos 10 DAT, iniciou-se a diferenciação entre os tratamentos.

3.8 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado com base na curva de retenção de água no solo e leitura média dos TS e DC. Foram instalados 3 dispositivos por tratamento. A irrigação era realizada quando a tensão de água no solo atingia o valor pré-determinado para cada tratamento. O mesmo procedimento foi adotado para o DC, o qual utilizou um circuito RC, para estimar a tensão de água no solo por meio da variação da amplitude da tensão elétrica (mV). A tensão, advinda do DC, foi mensurada com multímetro digital modelo ET-2075B da Minipa. Utilizando uma equação pré-ajustada correlacionando valores de tensão elétrica e umidade do solo (indiretamente tensão de água no solo), realizou-se o manejo da irrigação.

3.9 Cultivar de alface

Neste experimento, foi utilizado-se a cultivar *Azaléia*. As mudas de alface romana foram adquiridas no comércio local, no município de Lavras, em fornecedor especializado. Este tipo de alface tem se destacado, entre os consumidores, devido ao aroma, textura crocante e aparência.

3.10 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 às necessidades de correções nutricionais e controle fitossanitário.

3.11 Controle fitossanitário e adubação

Não foi observada nenhuma lesão nas folhas das plantas de alface, seja devido ao ataque de pragas ou doenças. Transcorrido 10 DAT aplicou-se 20 % de N. As outras duas doses foram aplicadas aos 20 DAT (30% N) e aos 28 DAT (30%) conforme recomendação técnica.

3.12 Avaliações

Foram avaliados, ao longo deste experimento, o comportamento do DC em relação às leituras de tensão de água no solo e a viabilidade do seu uso no manejo da irrigação em comparação com o TS. Foram avaliados também o número de irrigações, a produção da massa fresca de alface e o teor de clorofila total para os diferentes dispositivos nas diferentes tensões de água no solo.

3.12.1 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.

3.12.2 Massa fresca comercial

Neste estudo, avaliou-se a massa fresca comercial, ou seja, foi desconsiderado folhas com coloração amarela e/ou com sintomas de bordas queimadas.

3.12.3 Eficiência do uso da água

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

3.13 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 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação

No Gráfico 1, são apresentadas as variações diárias das umidades, máximas, médias e mínimas no interior da casa de vegetação.

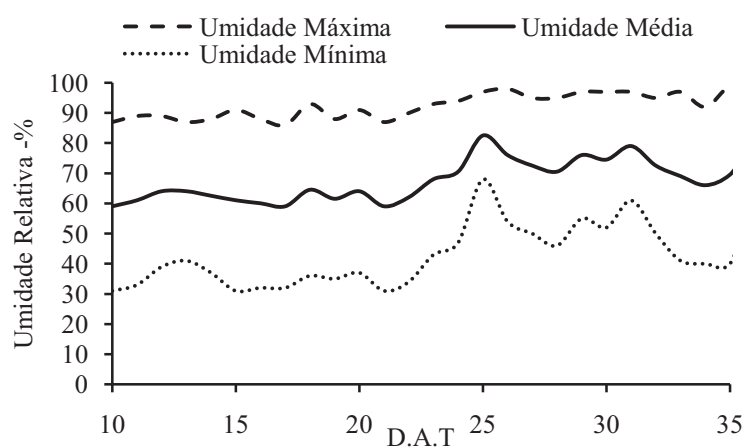


Gráfico 1 Valores diários máximos, médios e mínimos da umidade relativa do ar registrado durante a condução do experimento

A umidade relativa média ao longo deste experimento, no interior da casa de vegetação, foi de 67,23%. Sala e Costa (2012) ressaltam que a alta umidade relativa do ar associada a elevadas temperaturas podem favorecer o ataque de fungos e bactérias nas plantas de alface. Santos et al. (2010) recomendam, como faixa ideal, valores de umidade relativa do ar entre 60 a 80%. Ao longo deste experimento, a temperatura média do ar, no interior da casa de vegetação, foi de 27,03 °C (Gráfico 2).

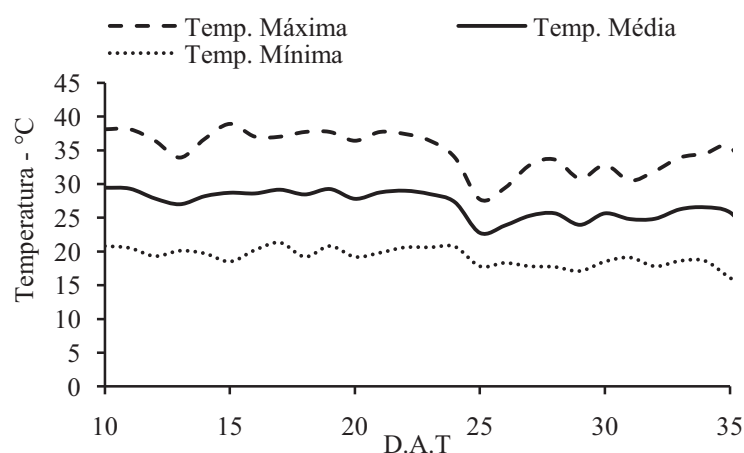


Gráfico 2 Valores diários máximos, médios e mínimos da temperatura do ar registrado durante a condução do experimento

De acordo com Sedyama, Ribeiro e Pedrosa (2007), a faixa de temperatura ótima para produção varia de 7 a 24 °C, entretanto, algumas cultivares resistem a geadas leves e temperaturas mais elevadas. Porém, para Resende et al. (2007), no cultivo sob condições de temperaturas elevadas, acima de 25 °C e dias longos ocorrem redução da fase vegetativa e pendoamento precoce. Neste experimento, embora ocorresse temperatura acima de 27 °C, não foi observado nenhum indício de pendoamento.

4.2 Dispositivos empregados no manejo da irrigação

Nos Gráficos 3 e 4, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os DC e TS, respectivamente. A linha horizontal tracejada representa o valor da capacidade de campo (7,30 kPa) e a linha horizontal contínua descreve a tensão de referência (15 kPa). A irrigação foi realizada toda vez que as leituras médias de tensão (linha contínua vermelha) estavam acima da linha de referência. Nota-se que, até os 20 DAT, o DC 03 registrou continuamente a tensão na capacidade de campo. A partir dos 20 DAT, este DC,

teve um comportamento similar ao DC 01 e DC 02, ou seja, a tensão de água no solo registrada não atingiu o valor da capacidade de campo, tendo implicações no número de irrigações.

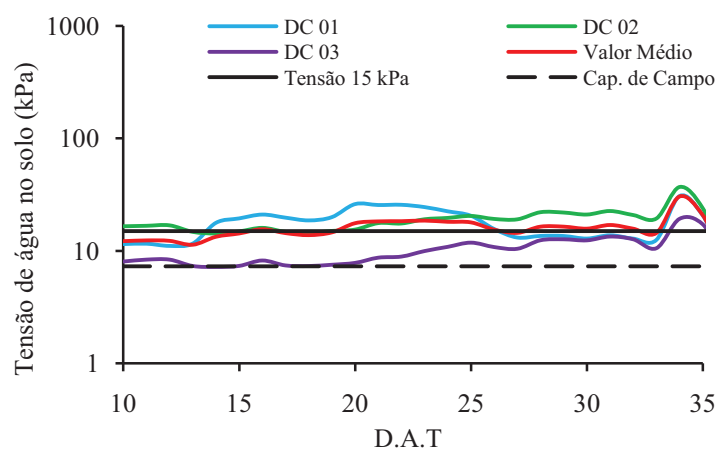


Gráfico 3 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 15 kPa

Observa-se no Gráfico 4, comportamento similar dos TS em relação aos DA. Ao longo do experimento, a maioria dos valores registrados de tensão pelos TS, não atingiu o valor de 7,30 kPa.

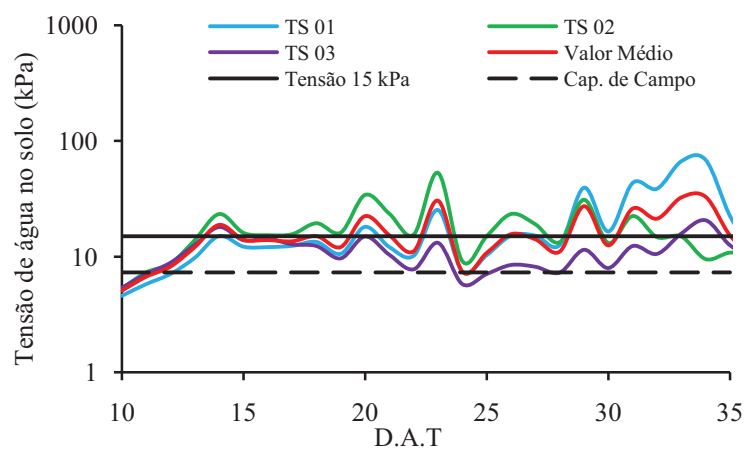


Gráfico 4 Comportamento da tensão de água no solo observado nos TS durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 15 kPa

No Gráfico 5, são mostrados os valores diários de tensão ao longo do ciclo da cultura no tratamento de 30 kPa. Para esse tratamento, observa-se uma menor variação dos valores em relação aos DC submetidos à tensão de 15 kPa. Vale ressaltar que tensões menores (solo mais úmido) apresentaram maior variação 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 bloco de gesso. Ao estudar o processo de polarização da água na estrutura porosa do bloco de gesso, Rusiniak (2002) concluiu que a dispersão dos valores de capacitância medidos pode ter sido influenciada pela presença dos íons de cálcio.

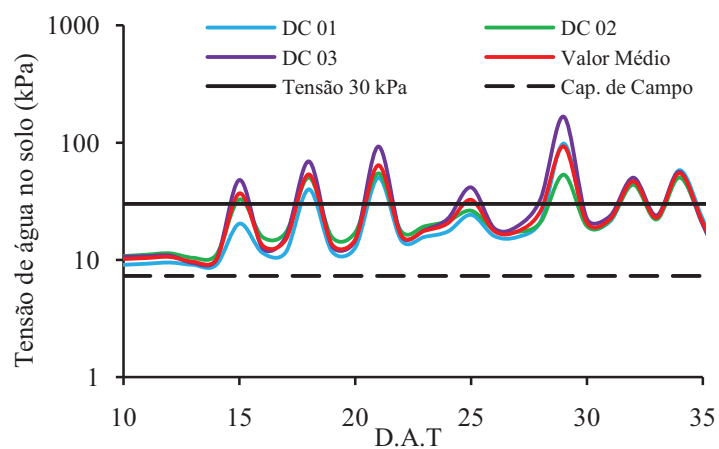


Gráfico 5 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 30 kPa

Similarmente, no Gráfico 6, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para tratamentos submetidos a 30 kPa e monitorados via TS. Observa-se que até os 14 DAT, os três TS apresentaram comportamento semelhante nas leituras de tensão. Após esse intervalo de tempo, as leituras registradas pelo TS 03 diferenciaram-se de forma expressiva dos demais TS até o término do experimento.

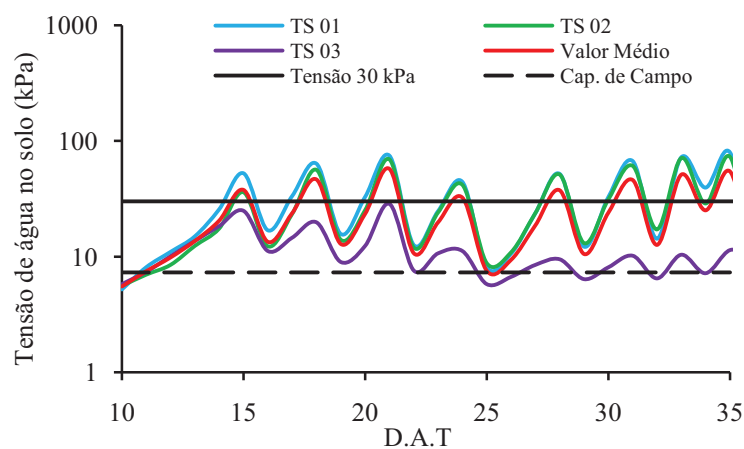


Gráfico 6 Comportamento da tensão de água no solo observado nos TS durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 30 kPa

No Gráfico 7, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os DA e tensão de 60 kPa. Seguindo o mesmo raciocínio, nota-se que as leituras de tensão, registradas pelos três DC, foram menos dispersas, comprovando a premissa de que, quanto maior a tensão de água no solo menor é a variação entre as leituras.

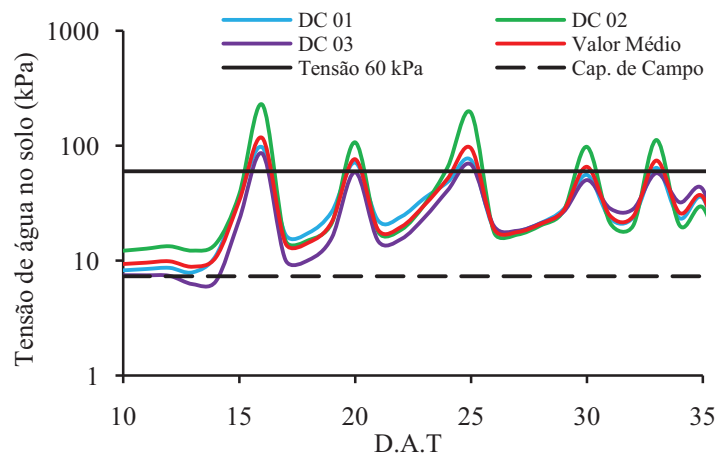


Gráfico 7 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 60 kPa

No Gráfico 8, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os TS e para as parcelas experimentais submetidas à tensão de 60 kPa. Neste tratamento, verifica-se que os três TS apresentaram um comportamento semelhante ao longo do experimento. Observa-se que, independente da tensão do tratamento e do dispositivo empregado no manejo da irrigação, a maioria dos valores registrados de tensão de água no solo não atingiram a capacidade de campo, para leituras realizadas no intervalo de 24 horas. Entretanto, valores mensurados imediatamente após as irrigações mostraram que tanto os TS quanto os DC atingiram o valor da capacidade de campo.

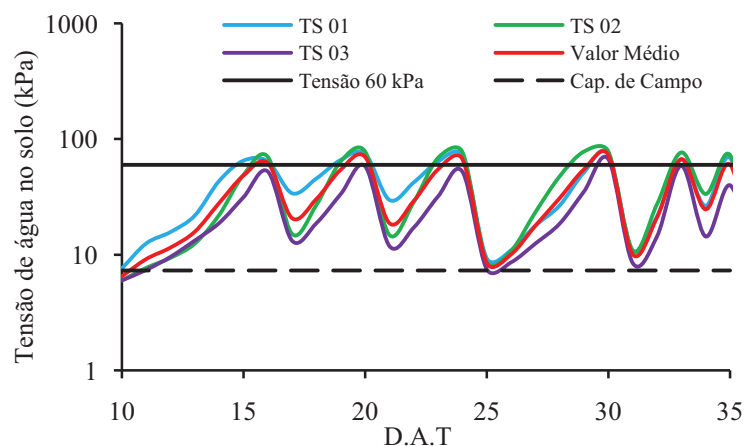


Gráfico 8 Comportamento da tensão de água no solo observado nos TS durante o ciclo da cultura da alface no tratamento de 60 kPa

4.3 Número de irrigação

No Gráfico 9, é mostrado o número de irrigações registrado nas diferentes tensões e dispositivos. Ao comparar os dois dispositivos, nota-se que, para as tensões de 30 e 60 kPa a diferença entre o número de irrigação foi menor.

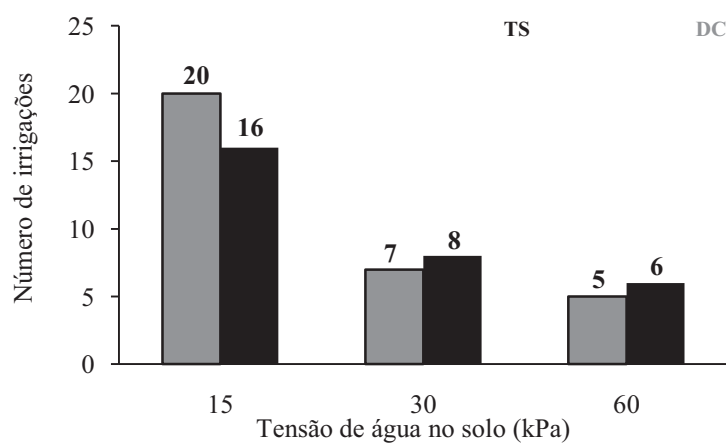


Gráfico 9 Número de irrigações registrado em função da tensão de água no solo e dispositivos

4.4 Produção de alface

De acordo com os resultados da análise de variância (Tabela 2), não houve interação entre os dois dispositivos, entretanto, a tensão de água no solo apresentou diferença significativa na massa fresca comercial por planta (M_{FC}) e volume de água aplicado (V_{APL}). Verifica-se também que não houve diferença significativa nos parâmetros: eficiência do uso da água (EUA) e clorofila total (CL_T). As clorofilas exercem importantes funções além de captar luz na fotossíntese. Para Rego e Possamai (2006), os teores de clorofila nas folhas são utilizados para estimar o potencial fotossintético das plantas, pela sua ligação direta com absorção, transferência de energia luminosa, crescimento e adaptação a diversos ambientes. Para Silva et al. (2007), perdas da clorofila em folhosa constituem um fator preponderante na qualidade dos produtos. Em alguns frutos, compõem um dos parâmetros mais importante na avaliação da qualidade pós-colheita.

Tabela 2 Resumo das análises de variância: massa fresca comercial por planta (M_{FC}), volume de água aplicado por planta (V_{APL}), clorofila total (CL_T) e eficiência de uso da água (EUA) em função dos dispositivos e da tensão de água no solo

| FV | GL | Quadrado Médio | | | |
|------------------|----|----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| | | M_{FC} (g) | V_{APL} (mL) | EUA ($g \cdot L^{-1}$) | CL_T ($\mu g \cdot g^{-1}$) |
| Dispositivos (D) | 1 | 84,56 ^{ns} | 2709,37 ^{ns} | 25,34 ^{ns} | 2,88 ^{ns} |
| Tensão (T) | 2 | 19956,42* | 18485517,17* | 17,89 ^{ns} | 0,53 ^{ns} |
| Interação (DxT) | 2 | 300,03 ^{ns} | 325286,00 ^{ns} | 1,56 ^{ns} | 1,64 ^{ns} |
| Resíduo | 18 | 607,64 | 165581,35 | 6,14 | 1,51 |
| Média Geral | - | 143,10 | 4571,21 | 31,71 | 8,07 |
| CV | - | 17,23 | 8,90 | 7,81 | 15,25 |

*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.

Na Figura 5, é mostrada a alface romana submetida a diferentes dispositivos e tensões de água no solo.



Figura 5 Desenvolvimento da alface romana com manejo de irrigação por meio de DC (a) e pelo TS (b) no final do experimento

Pode-se observar que, conforme a tensão de água no solo aumenta há um decréscimo na área foliar das plantas de alface. Tal comportamento está de acordo com os resultados observados na Tabela 2. Resultados recentes têm

evidenciado que, em geral, as hortaliças apresentam melhor qualidade e produzem mais quando a tensão de água no solo se aproxima da capacidade de campo.

No Gráfico 10, é mostrado o comportamento da M_{FC} nas diferentes tensões. De acordo com a equação ajustada, a tensão ótima para a M_{FC} foi de 15 kPa, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação.

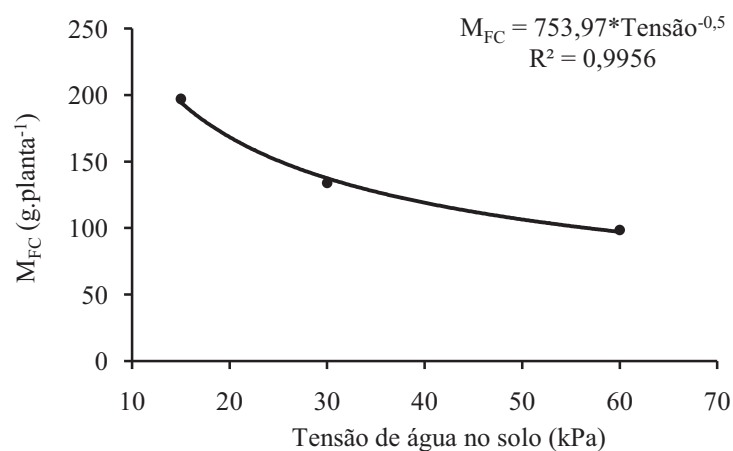


Gráfico 10 Massa fresca comercial da alface romana em função das diferentes tensões de água no solo

Santos e Pereira (2004), avaliando o comportamento da alface americana (*cv. Raider*) sob diferentes tensões de água no solo, em ambiente protegido, concluíram que, no emprego de tensões em torno de 15 kPa, há tendência em obter plantas mais altas, com maior peso de matéria fresca comercial. Comportamento similar foi observado nas plantas de alface romana, ou seja, em parcelas experimentais submetidas a tensões acima de 15 kPa, as plantas tenderam a ficar menores. Geisenhoff (2008), avaliando a produção de alface americana (*cv. Raider-Plus*), menciona que a produtividade da cultura foi reduzida linearmente em função do aumento da tensão de água no solo no intervalo entre 12 a 70 kPa.

Com o objetivo de determinar a tensão ideal de água no solo para um desenvolvimento adequado da cultura da alface, Frenz e Lechl (1981) apud Lima Júnior (2008) conduziram um experimento em casa de vegetação, utilizando sistema de irrigação por gotejamento e observaram que a tensão de 14 kPa proporcionou uma maior quantidade de matéria fresca e produtividade. Diante dos trabalhos supramencionados, observa-se que, a massa fresca comercial da alface romana seguiu o mesmo comportamento da alface do tipo americana.

No Gráfico 11, observa-se que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, o volume de água aplicado foi maior que o utilizado no tratamento de 15 kPa.

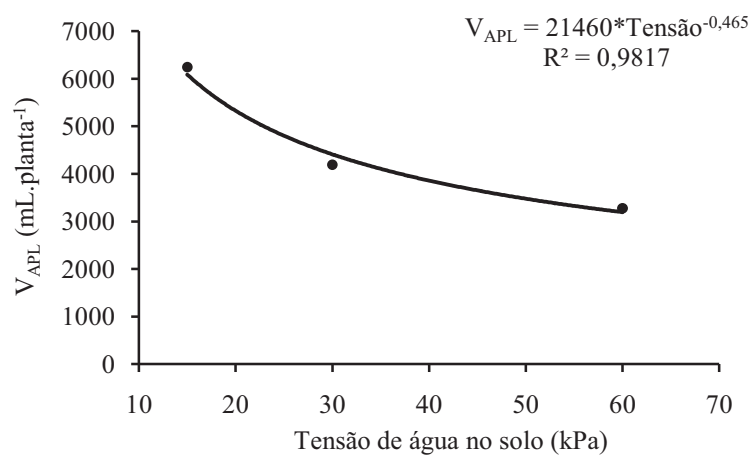


Gráfico 11 Volume de água aplicado durante o ciclo da cultura da alface romana em função da tensão de água no solo

5 CONCLUSÕES

- a) O manejo da irrigação utilizando o dispositivo capacitivo proporcionou a mesma produção da cultura da alface romana que aquela proporcionada pelo manejo utilizando tensiômetro;
- b) O uso da tensão elétrica de saída (mV_{rms}) dos dispositivos capacitivos demonstrou ser um bom parâmetro para estimar a umidade do solo;
- c) Os parâmetros: volume de água aplicado, eficiência de uso da água e teor de clorofila total foram estatisticamente não significativos;
- d) Nota-se que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, a massa fresca comercial foi maior quando submetida à tensão de água no solo de 15 kPa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, W. F. **Gotejamento por pulso e cobertura do solo na formação do bulbo molhado e produtividade da alface americana**. 2012. 79 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Journal Plant Physiology**, Minneapolis, v. 24, n. 1, p. 1-15, Jan. 1949.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos mínimos para elaboração de projeto de sistema de irrigação localizada**. ABNT, Projeto 12:02.08-022. São Paulo, 1986. 8 p.
- BANDEIRA, G. R. L. et al. Manejo de irrigação para cultivo de alface em ambiente protegido. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 2, p. 237-241, Apr./June 2011.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.
- 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. 306p.
- 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.
- FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 402 p.
- GEISENHOFF, L. O. **Produção de alface americana utilizando mulching dupla face, sob diferentes tensões de água no solo**. 2008. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

- LIMA JÚNIOR, J. A. **Análise técnica e econômica da produção de alface americana irrigada por gotejamento**. 2008. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- LUNA, M. C. et al. Optimizing water management to control respiration rate and reduce browning and microbial load of fresh-cut romaine lettuce. **Journal Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 80, n. 1, p. 9–17, June 2013.
- MACIEIRA, G. A. A. **Competição de cultivares de alface romana no outono e primavera no município de Boa Esperança – Minas Gerais**. 2011. 36 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- MAROUELLI, W. A. et al. Manejo da água de irrigação. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 157-232.
- MAROUELLI, W. A.; SOUSA, V. F. Irrigação e fertirrigação. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 23-26.
- PIRES, M. M. M. L. et al. Produção do meloeiro submetido a diferentes manejos de água com o uso de manta de tecido não tecido. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, n. 31, p. 304-310, abr./jun. 2013.
- REGO, G. M.; POSSAMAI, E. Efeito do sombreamento sobre o teor de clorofila e crescimento inicial do jequitibá-rosa. **Boletim de Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 53, p. 179-194, jul./dez. 2006.
- RESENDE, F. V. et al. **Cultivo de alface em sistema orgânico de produção**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007. 17 p. (Circular Técnica, 56).
- RUSINIAK, L. Spontaneous polarization of water in porous structure of a solid body. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 148, n. 2, p. 313-319, July 2002.
- SALA, F. C.; COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 2, p. 187-194, Abr./June 2012.

SÁNCHEZ, A. M. et al. Low oxygen levels and light exposure affect quality of fresh-cut Romaine lettuce. **Journal Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 59, p. 34–42, Jan. 2011.

SANTOS, A. N. et al. Cultivo hidropônico de alface com água salobra subterrânea e rejeito da dessalinização em Ibimirim, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 961-969, set. 2010.

SANTOS, S. R.; PEREIRA, G. M. Comportamento da alface tipo americana sob diferentes tensões da água no solo, em ambiente protegido. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 569-577, set./dez. 2004.

SEDIYAMA, M. A. N.; RIBEIRO, J. M. O.; PEDROSA, M. W. (Ed.). Alface. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **101 culturas**: manual de tecnologias agrícolas. Belo Horizonte, 2007. p. 53-62.

SILVA, E. L. et al. **Manejo de irrigação das principais culturas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2000. 85 p.

SILVA, J. M. et al. Métodos de determinação de clorofila em alface e cebolinha minimamente processadas. **Revista Iberoamericana de Tecnología de Postcosecha**, México, v. 8, n. 2, p. 53-59, Feb. 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE USDA. U.S. Department of Agriculture. **Statistics of vegetables and melons, 2011**. Disponível em:
<http://www.nass.usda.gov/Publications/Ag_Statistics/2011/Chapter04.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2013.

ZHAN, L. et al. Browning inhibition and quality preservation of fresh-cut romaine lettuce exposed to high intensity light. **Journal Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 14, n. 1, p. 70-76, Apr. 2012.

CAPÍTULO 3 Comparação de dispositivo capacitivo e sensor de matriz granular, no manejo da irrigação

RESUMO

A expansão crescente da área irrigada no Brasil, com grandes culturas, sobretudo, na última década, revela o reconhecimento de muitos produtores rurais sobre a influência da prática da irrigação como uma das atividades agrícolas viáveis para o aumento da produtividade. Dentre as grandes culturas vegetais, ressalta-se a importância do milho, que, no Brasil, sempre foi uma cultura típica de sequeiro. Pesquisas têm evidenciado que a produtividade de milho irrigado pode proporcionar aumento de 30 a 40% em relação à área de sequeiro. Apesar desse benefício, no Brasil, poucos são os usuários da agricultura irrigada que adotam critérios de uso e manejo da água de irrigação repercutindo negativamente no custo de produção e na sustentabilidade da área cultivada. Diante destas circunstâncias, este trabalho teve como objetivo comparar o uso dos Dispositivos Capacitivos (DC) e de Sensores de Matriz Granular (SMG) no manejo da água de irrigação no cultivo do milho. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizado em esquema fatorial 2 x 5, sendo dois dispositivos (SMG e DC) e cinco valores de tensão de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 120 kPa e 180 kPa) e quatro blocos, totalizando quarenta parcelas experimentais. Ao longo do experimento, notou-se que, tanto os DC quanto os SMG não registraram leituras relativas à capacidade de campo, mesmo após a irrigação, possivelmente, em decorrência da biocorrosão ocorrida na superfície metálica dos eletrodos de ambos os dispositivos. Entretanto, excetuando-se o tratamento submetido à tensão de água no solo de 180 kPa, o manejo da irrigação realizado por meio das leituras dos SMG, proporcionou maior volume de água aplicado em relação ao DC e que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, a produtividade de grãos de milho foi maior na faixa de 20 a 40 kPa.

Palavras - chave: Déficit hídrico. Biocorrosão. Milho irrigado.

ABSTRACT

The increasing expansion of irrigated areas in Brazil with major crops, especially in the last decade, reveals the recognition of many farmers concerning the influence of irrigation practice as one of the viable agricultural activities to increase productivity. Among the major crops, the importance of corn is highlighted, which in Brazil has always been a typical summer crop. Research has shown that the productivity of irrigated maize can provide an increase of 30-40 % compared to the rainfed area. Despite this benefit, in Brazil, there are few users of irrigated agriculture adopting the criteria for use and management of irrigation water, impacting negatively on the cost of production and the sustainability of the cultivated area. Given these circumstances, this study aimed to compare the use of a Capacitive Device (CD) and Granular Matrix Sensors (GMS) in the management of irrigation water under corn. The experimental design used was randomized blocks in factorial 2 x 5, two devices (GMS and CD) and five values of soil water tension (20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 120 kPa and 180 kPa) and four blocks, totaling forty experimental plots. Throughout the experiment, it was noted that neither the CD or GMS recorded readings on the field capacity, even after irrigation, possibly due to biocorrosion that occurred on the metallic surface of the electrodes of both devices. However, except for the treatment submitted to the soil water tension of 180 kPa, irrigation management performed, through readings of the GMS, with a greater volume of water applied compared to the CD, and regardless of the device used in the management of irrigation, grain yield of maize was higher in the range of 20-40 kPa.

Keywords: Water deficit. Biocorrosion. Maize irrigated.

1 INTRODUÇÃO

A expansão crescente da área irrigada no Brasil, com grandes culturas, sobretudo, na última década, revela o reconhecimento de muitos produtores rurais sobre a influência da prática da irrigação como uma das atividades agrícolas viáveis para o aumento da produtividade, garantia e diversificação da produção.

Dentre as grandes culturas vegetais, ressalta-se a importância do milho, devida a sua ampla utilização, desde consumo direto na alimentação humana e formulação de ração animal, até na indústria para produção de óleo vegetal, álcool e biocombustível. Originária da América Central, a cultura do milho (*Zea mays L.*) configura-se como uma das culturas vegetais mais importantes do mundo em termos de produção de grãos. No Brasil, este cereal é cultivado em todas as regiões, com destaque às regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul sendo responsável pelo maior percentual de produção no país. Apesar do comprovado sucesso da produção de grãos de milho, a produtividade média nacional, está muito aquém de países como a França e Estados Unidos.

Tradicionalmente, no Brasil, o milho sempre foi uma cultura típica de sequeiro. Entretanto, devido a maior demanda pelo mercado internacional e dentro de um foco mais empresarial, a irrigação passa a ser considerada como uma estratégia para elevar a rentabilidade na propriedade rural. Pesquisas têm evidenciado que, a produtividade de milho irrigado pode proporcionar aumento de 30 a 40% em relação à área de sequeiro. Apesar desse benefício, no Brasil, poucos são os usuários da agricultura irrigada que adotam critérios de uso e manejo da água de irrigação repercutindo negativamente no custo de produção e na sustentabilidade da área cultivada.

Diante destas circunstancias, o trabalho teve como objetivo, comparar o uso de um dispositivo capacitivo (DC) e de sensores de matriz granular (SMG) no manejo da água de irrigação no cultivo do milho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A cultura do milho tem sido considerada, atualmente, um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo devido ao seu alto potencial de produção e valor nutricional (BUSATO et al., 2012). De acordo com esses autores, no Brasil este cereal é cultivado em todas as regiões, com destaque para as regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, das quais provém a maior produção. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2013), a produção nacional, que totalizou 80.755.776 toneladas, foi 13,3% maior que a obtida em 2012. De fato, ao longo das últimas décadas a produção de grãos de milho continua a aumentar. Segundo boletim Food and Agriculture Organization, FAO (2012), produtividades entre 11 e 14 ton.ha⁻¹ são normalmente conseguidos em áreas sob irrigação e com alta fertilidade. De acordo com Pereira Filho e Cruz (2003), o nível médio nacional de produtividade é muito baixo, cerca de 3,4 ton.ha⁻¹. Para estes autores, o potencial produtivo do milho é o somatório da melhoria genética (47,75%) e da melhoria ambiental (52,25%), que é a utilização de técnicas de manejo cultural, dentre os quais se inclui o manejo adequado da água de irrigação. Costa, Pinho e Parry (2008) observaram que a cultura do milho é afetada pela deficiência hídrica, com alterações no crescimento das plantas e expansão da área foliar durante os estádios vegetativos e da produção de matéria seca da parte aérea. Estima-se que um estresse hídrico, durante o florescimento por um período de sete dias, pode promover uma redução na produção de grãos em 50%.

Diante do aumento da competição por recursos hídricos, há uma clara necessidade de aumentar a eficiência no manejo da irrigação a fim de garantir uma agricultura sustentável. Assim, uma vez implantado o sistema de irrigação o usuário necessita de uma estratégia de manejo da irrigação que defina,

alicerçado em dados técnico-agronômicos, o momento e a quantidade de água a ser aplicada.

Apesar da disponibilidade de vários métodos de manejo da irrigação, no Brasil, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não adota nenhum critério para o uso racional da água de irrigação. De acordo com Marouelli et al. (2011), a decisão de quando irrigar é simplificada de acordo com cada situação particular ou estratégia de manejo adotada, com base na avaliação da deficiência de água no solo ou associados por meio de indicadores com base na planta e/ou atmosfera. Informações sobre o teor de água existente na zona radicular das plantas ou energia com que a água está retida na matriz do solo têm sido um dos métodos utilizados para definição do momento de irrigar e pode ser feito usando sensores de matriz granular (SMG). Tais dispositivos têm sido utilizados, em sistemas automáticos, para irrigação do algodão (*Gossipium spp.*), cebola (*Allium cepa*), batata (*Solanum tuberosum*), tomate (*Lycopersicon esculentum*), plantas utilizadas em estabilidades de taludes e paisagismo (CARPENA et al., 2005). No caso do milho, observam-se poucas informações acerca do uso dos SMG no manejo da irrigação, sobretudo, no Brasil, em decorrência do custo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do tipo arco, próximo ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras - MG, no período de fevereiro 2013 a junho de 2013. A casa de vegetação está localizada nas seguintes coordenadas geográficas: 21° 13' 46'' de latitude Sul e 44° 58' 36'' de longitude Oeste e altitude de 872 metros. Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta um clima Cwa, ou seja, clima temperado suave, chuvoso, com inverno seco (DANTAS; CARVALHO, FERREIRA, 2007).

O solo utilizado neste experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico segundo novo sistema hierarquizado (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA, 2006) de classe textural argilosa. As análises físicas e químicas do solo foram realizadas no Departamento de Ciência do Solo da UFLA e estão representadas nas Tabelas 4 e 5 (ver Capítulo 1). O modelo matemático utilizado para descrição da curva característica de retenção de água no LVD é descrito pelo Gráfico 1 (ver Capítulo 1).

O registro da temperatura e da umidade relativa foi realizado com auxílio de um termo-higrômetro digital modelo HT-600 da Instrutherm.

3.1 Adubação

Diante dos resultados da análise química do solo, verificou-se que o pH estava dentro da faixa aceitável para a cultura do milho, não havendo a necessidade de calagem. Antes da semeadura (11/10/2012), foi aplicado o equivalente a 400 kg.ha⁻¹ de NPK (10 - 30 - 10).

3.2 Sensores de matriz granular e dispositivo capacitivo

Neste experimento, foram utilizados 30 sensores para monitorar a tensão de água no solo, sendo 15 de cada tipo (SMG e DC). Antes de instalar tais dispositivos, esses foram saturados em água destilada durante 24 horas. Após esse procedimento, realizou-se a instalação no solo a uma profundidade de 20 cm. As leituras da tensão de água no solo foram coletadas diariamente através do medidor Watermark[®] no caso dos SMG e multímetro digital no caso dos DC. Os valores de tensão elétrica (mV_{rms}), advindos do DC foram convertidos em tensão de água no solo (kPa) por meio de equação previamente ajustada e disposta em forma de tabela para uso em campo.

3.3 Delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 5, sendo dois dispositivos (SMG e DC) e cinco valores de tensão de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 120 kPa e 180 kPa) e quatro blocos, totalizando 40 parcelas experimentais. O espaçamento adotado foi de 0,4 x 0,5 metros (densidade de plantio 50.000 planta.ha⁻¹), conforme recomendação técnica, sendo necessário utilizar duas casas de vegetação com largura de 6 metros e comprimento de 15 metros para atender a esse critério (Figuras 1 e 2).

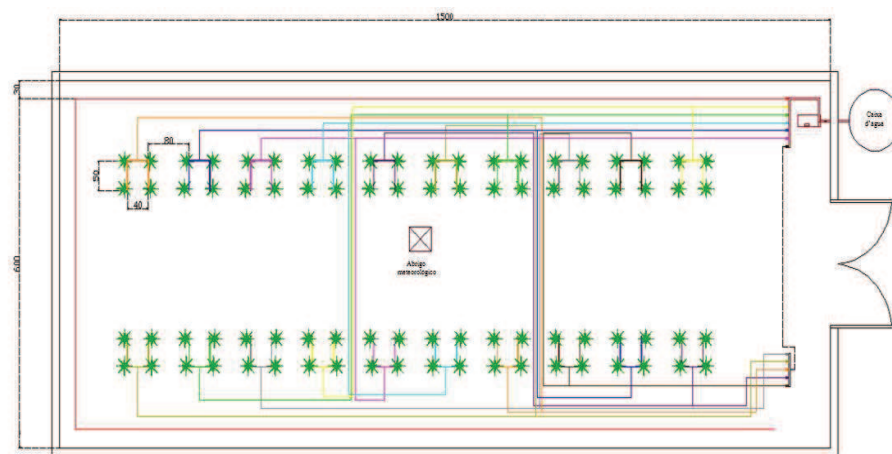


Figura 1 Croqui da área experimental – casa de vegetação 01

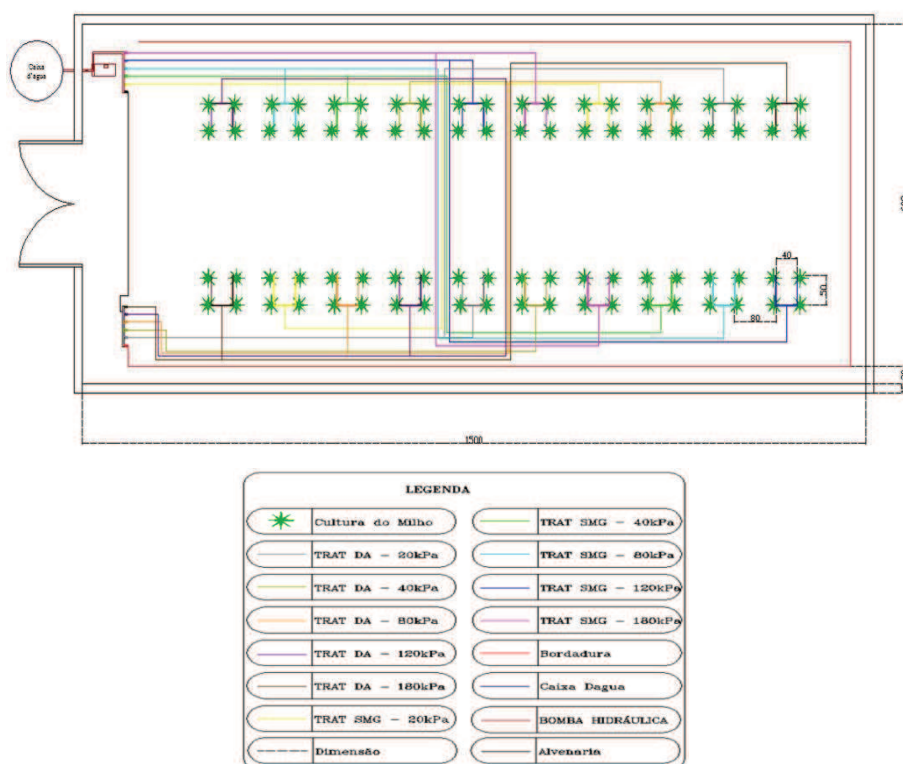


Figura 2 Croqui da área experimental – casa de vegetação 02

3.4 Sistema de irrigação

Adotou-se o sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes. As linhas laterais tinham início no cabeçal de controle, o qual foi acoplado a fonte de água pressurizada sendo composto por bomba hidráulica modelo BC 91S da Schneider e potência de ½ CV. Foi instalado dois gotejadores por planta, sendo um de 2 L.h⁻¹ e outro de 4 L.h⁻¹. Após a montagem do sistema de irrigação, realizou-se a avaliação da uniformidade de vazão, por meio da equação (1).

$$CU = \left(\frac{q_{25\%}}{q_{\text{média}}} \right) \quad (1)$$

Em que,

CU = Coeficiente de uniformidade da vazão, decimal;

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

$q_{\text{média}}$ = média geral, L.h⁻¹.

Para este experimento, o CU foi de 0,9617. Este resultado está de acordo com os valores recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1986).

3.5 Instalação do experimento

Em cada casa de vegetação, as parcelas experimentais foram dispostas em 2 fileiras, contendo cada uma 10 parcelas, num total de 20 parcelas experimentais por casa de vegetação (Figura 3), e em ambas utilizou-se bordaduras a fim de evitar possíveis efeitos do ambiente externo.



Figura 3 Fotos da área experimental durante a condução do experimento com a cultura do milho

3.6 Semeadura e manejo inicial

Após a montagem e teste do sistema de irrigação, foram semeadas, com o solo na capacidade de campo, quatro sementes por cova, a uma profundidade de 2 cm. A emergência das plântulas ocorreu com 6 dias após a semeadura (DAS). Aos 8 DAS, efetuou-se o desbaste, deixando um a planta por cova. Todos os tratamentos, inclusive as bordaduras, receberam o mesmo volume de água, correspondente à capacidade de campo até os 9 DAS. A partir dos 10 DAS, iniciou-se a diferenciação entre os tratamentos. A semeadura foi realizada no verão, no dia 01/02/2013 e a colheita no dia 16/06/2013, totalizando 135 dias.

3.7 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado com base na curva de retenção de água no solo e no valor médio das leituras dos DC e SMG. Foram instalados três dispositivos por tratamento a 0,20 metros de profundidade. A irrigação era realizada toda vez que a tensão de água no solo atingia o valor estipulado para cada tratamento. As leituras do DC foram realizadas por meio de um multímetro digital. Os valores médios obtidos foram interpolados numa planilha, na qual, havia os valores previamente correlacionados de tensão de água no solo (kPa) com a tensão elétrica (mV_{rms}) advinda dos DA. Todas as leituras foram realizadas diariamente no período da manhã. O volume de água aplicado pela irrigação foi calculado pela equação (2).

$$V = (\theta_{cc} - \theta_{trat}) \times V_{solo} \quad (2)$$

Em que:

V = Volume de água a ser aplicado, (Litros);

θ_{cc} = Umidade na capacidade de campo, ($cm^3 \cdot cm^{-3}$);

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

V_{solo} = Volume de solo, (Litros).

Para o presente experimento o volume de solo explorado pela cultura do milho foi de 80 Litros (espaçamento de 0,4 m x 0,5 m e profundidade efetiva do sistema radicular de 0,4 m).

3.8 Cultivar de milho

Utilizou-se a cultivar BG 7051H, transgênico, do tipo híbrido triplo e ciclo superprecoce. As sementes de milho foram adquiridas no comércio local, no município de Lavras, em fornecedor especializado.

3.9 Práticas culturais

Ao longo do ciclo da cultura, foi realizada a capina nas parcelas experimentais e na bordadura quando necessário. 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 à necessidade de correções nutricionais e controle fitossanitário.

3.10 Controle fitossanitário e adubação

Até os 120 DAS, não foi observada nenhuma lesão nas folhas das plantas de milho. Entretanto, a partir das duas últimas semanas do término do experimento, observou-se o ataque de fungos (*Phaeosphaeria maydis*) em algumas plantas. Optou-se por não aplicar nenhum defensivo químico, pois, as plantas já estavam em senescência. Foi aplicado, ao longo do ciclo da cultura, o equivalente a 300 kg.ha⁻¹ de adubo FH Nitromais. Tal aplicação foi parcelada em três doses, sendo: 100 kg.ha⁻¹ aos 30 DAS, 100 kg.ha⁻¹ aos 45 DAS e o restante aos 60 DAS. Aplicou-se também, aos 45 DAS, o equivalente a 3 kg.ha⁻¹ de sulfato de zinco e 2,5 kg.ha⁻¹ de ácido bórico.

3.11 Avaliações

Foram avaliados o número de irrigações, volume de água aplicado e produção de grãos secos para os diferentes dispositivos e tensões de água no solo. Ao término do experimento, o DC foi retirado do solo a fim de verificar seu estado físico. Análise da superfície metálica dos cilindros de cobre do DC foi realizada por meio de Microscópio Eletrônico de Varredura com a finalidade de verificar sua integridade físico-química. Avaliou-se a produtividade de cada tratamento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), determinando a massa de grãos secos, utilizando o método padrão de estufa. Relacionou-se a produção média de grãos de cada parcela com o volume médio aplicado, a fim de calcular a eficiência do uso da água ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

3.12 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 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação

No Gráfico 1, são apresentadas as variações diárias da umidade relativa do ar máxima, média e mínima no interior da casa de vegetação.

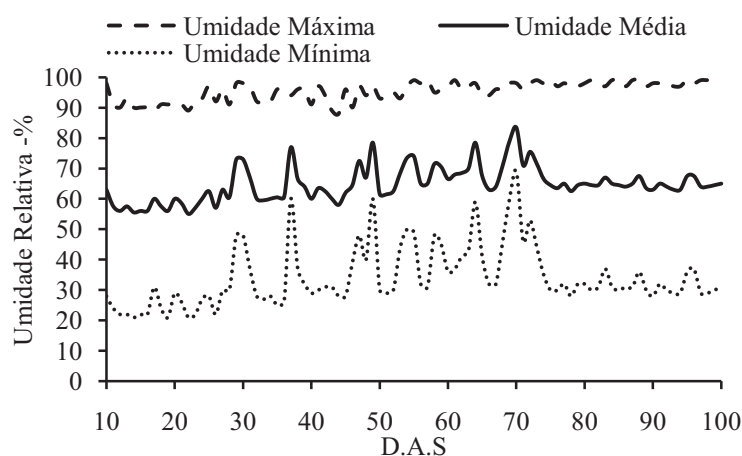


Gráfico 1 Valores diários máximos, médios e mínimos da umidade relativa do ar registrados durante a condução do experimento

Ao longo deste experimento, a umidade relativa média do ar, no interior da casa de vegetação, foi de 64,80%. Pesquisas têm evidenciado que temperaturas e umidade relativa do ar elevadas, por longos períodos, podem favorecer o aparecimento de doenças foliares. De acordo com Pinto, Oliveira e Fernandes (2007), umidade relativa acima de 60% e temperaturas noturnas entre 14 e 20 °C podem favorecer o aparecimento de lesões foliares causadas por *Phaeosphaeria maydis*. A temperatura média do ar ao longo do experimento, no interior da casa de vegetação, foi de 24,70 °C (Gráfico 2).

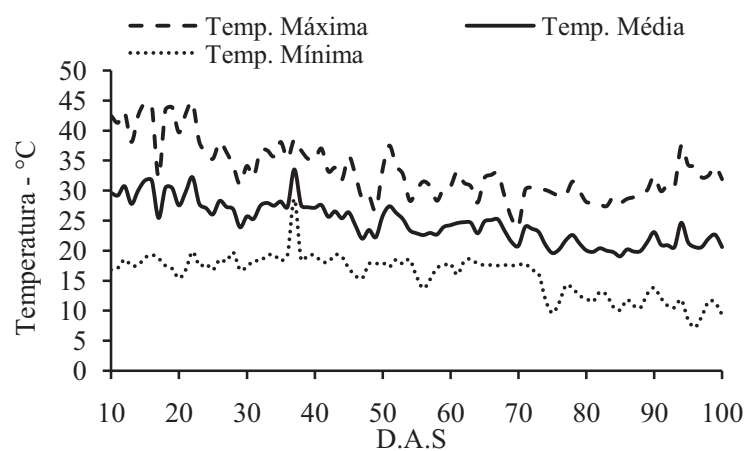


Gráfico 2 Valores diários máximos, médios e mínimos da temperatura do ar registrados durante a condução do experimento

O milho é uma cultura de crescimento rápido que rende melhor com temperatura moderada e oferta abundante de água. A temperatura diurna ideal está entre 26 a 30 °C conforme afirmam HOEFT et al. (2000). Esses autores ressaltam que, quando a temperatura atinge 37 °C, ou superior, é difícil manter o movimento adequado da água através das plantas, mesmo sob irrigação.

4.2 Dispositivos empregados no manejo da irrigação

Nos Gráficos 3 e 4, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os DC e SMG, respectivamente. A linha horizontal tracejada representa o valor da capacidade de campo (7,30 kPa) e a linha horizontal contínua descreve a tensão de referência (20 kPa). A irrigação foi realizada toda vez que as leituras médias de tensão (linha contínua vermelha) estavam acima da linha de referência.

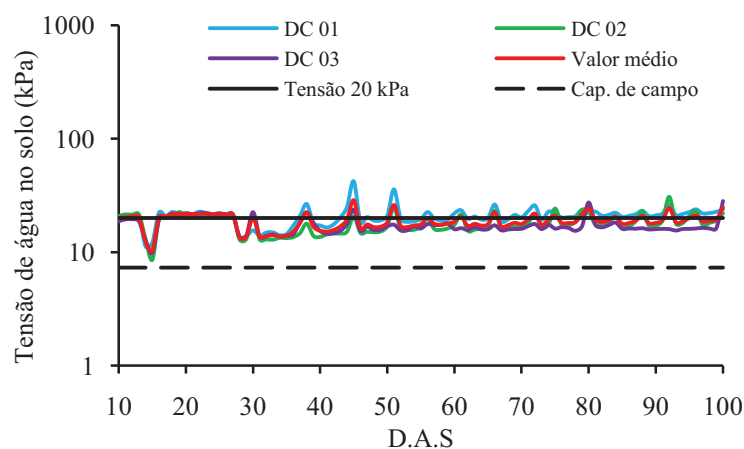


Gráfico 3 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 20 kPa

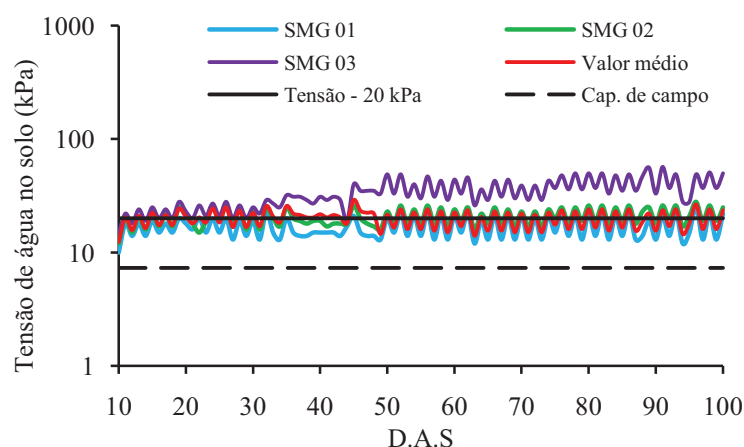


Gráfico 4 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 20 kPa

Observa-se que após a irrigação, as leituras de tensão de água no solo realizadas tanto pelo DC quanto pelo SMG, não atingiram o valor da capacidade de campo. Aos 13 DAS, os DC foram substituídos a fim de sanar esse problema. Aos 14 DAS, nota-se que o valor da capacidade de campo foi atingido. Entretanto, após esse dia, os DC tiveram o mesmo comportamento dos DC

substituídos. A partir dos 30 DAS, as leituras do SMG 03 foram desconsideradas do valor médio, pois, os valores mensurados não eram menores que 25 kPa. Optou-se por não retirá-lo do solo, para não comprometer o sistema radicular das plantas de milho. Observa-se, no Gráfico 5, que o manejo da irrigação realizado por meio do DC, proporcionou um menor número de irrigações em relação aos SMG, tendo implicações no volume de água aplicado.

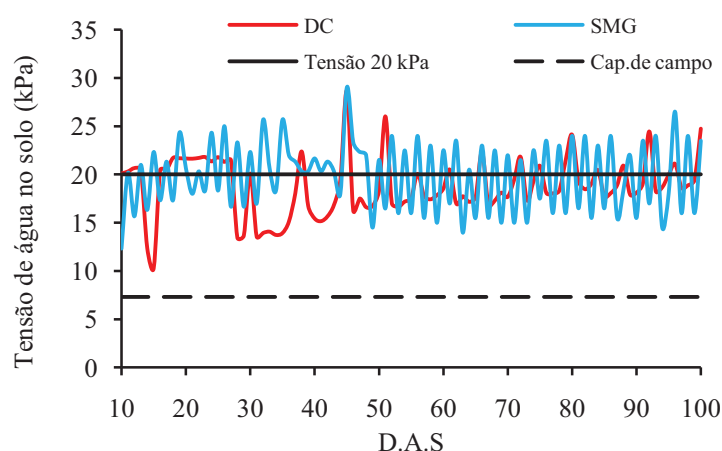


Gráfico 5 Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 20 kPa

Nos Gráficos 6 e 7, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo para os DC e SMG, respectivamente. A linha horizontal contínua descreve a tensão de referência de 40 kPa. Nota-se, no Gráfico 8, que os três DC tiveram comportamento similar ao longo de boa parte deste experimento. Exceto a partir dos 77 DAS, em que DC 01 apresentou valores maiores de tensão de água no solo em relação aos outros dois DC.

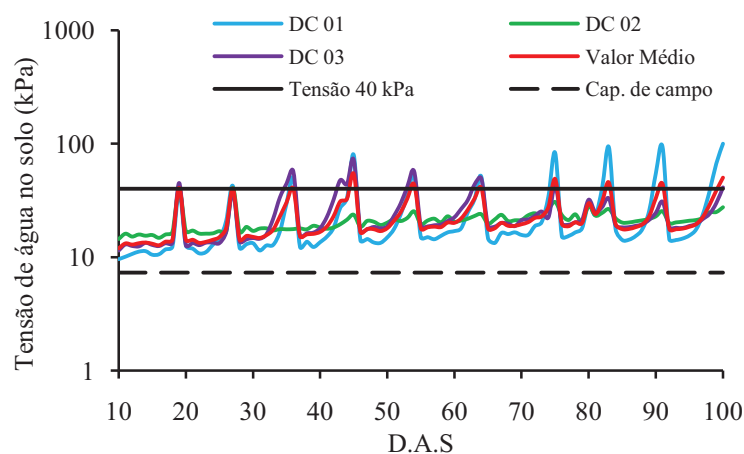


Gráfico 6 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 40 kPa

No Gráfico 7, verifica-se menor variação entre as leituras de tensão de água no solo. Quando se compara as variações nas leituras de tensão de água no solo entre os tratamentos de 20 e 40 kPa, nota-se maior variação na menor tensão. É importante frisar que, quando irrigado tanto os DC quanto os SMG, eles não registravam o valor tensão na capacidade de campo. Tal fato pode ter influenciado o número de irrigações e, por conseguinte, o volume de água aplicado. Evidentemente a demanda de água pelas plantas é variável ao longo do ciclo vegetativo, porém, ao efetuar uma irrigação espera-se que os dispositivos utilizados para monitorar a umidade do solo ou tensão de água no solo, sejam capazes de registrar valores coerentes, isto é, atingir pelo menos o valor da capacidade de campo logo após a irrigação, o que não foi observado ao longo deste experimento.

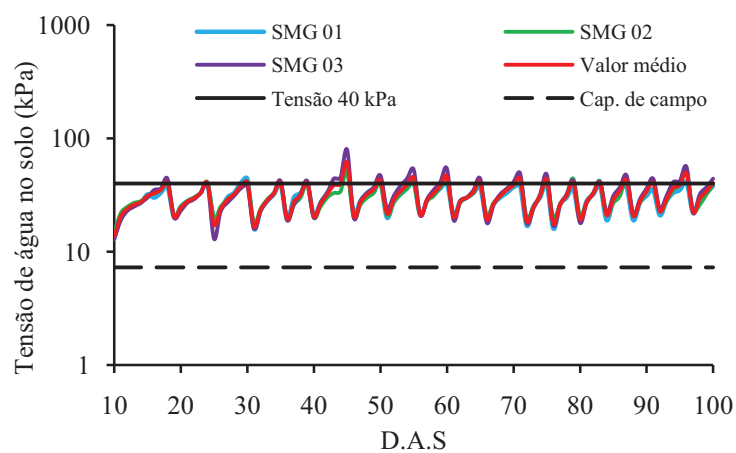


Gráfico 7 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 40 kPa

Analisando o Gráfico 8 nota-se que, novamente o número de irrigações foi menor quando se utilizou os DC no manejo da irrigação.

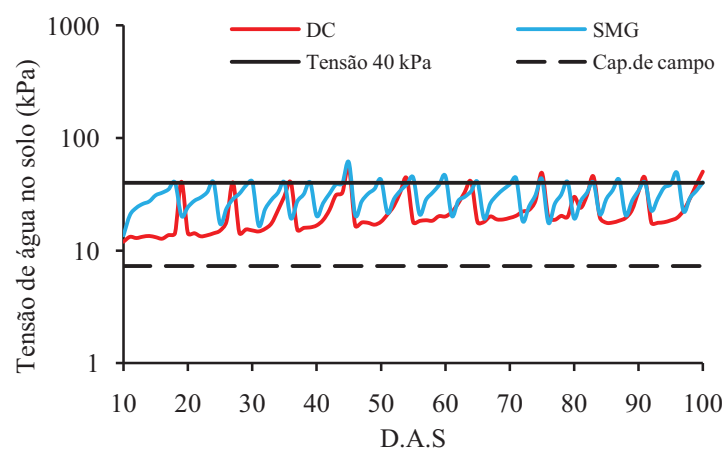


Gráfico 8 Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 40 kPa

Nos Gráficos 9 e 10, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os DC e SMG, respectivamente. A linha horizontal contínua descreve a tensão de referência de 80 kPa.

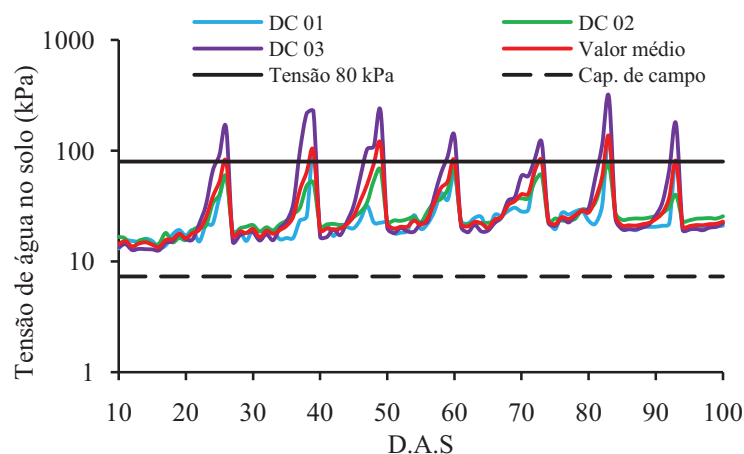


Gráfico 9 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 80 kPa

Um fato interessante a ser enfatizado refere-se ao comportamento da linha de tensão de água no solo ao longo dos dias. A linha de tensão de água no solo, utilizando o DC, apresentou concavidades voltadas para cima, diferentemente dos SMG que apresentaram concavidades voltadas para baixo, ou seja, para um mesmo intervalo de tempo, as leituras de tensão de água no solo registradas pelos SMG foram maiores em relação aos DC.

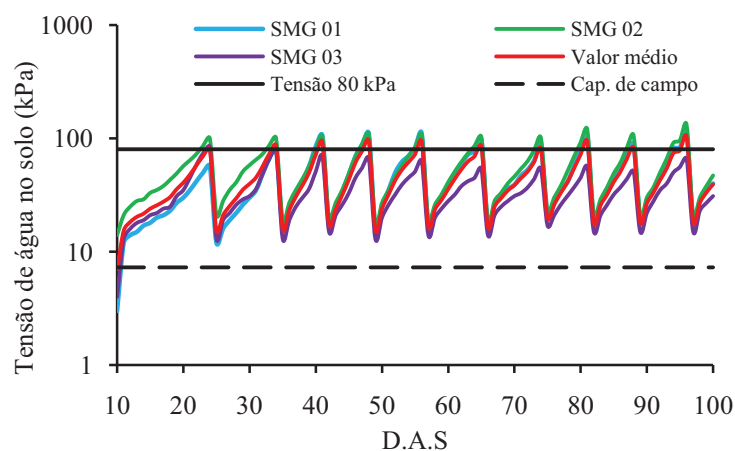


Gráfico 10 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 80 kPa

Ao realizar uma irrigação, utilizando os SMG, observa-se nos dias seguintes um valor de tensão de água no solo maior (Gráfico 11), em relação aos valores de tensão de água no solo registrados pelo DC. Esse comportamento pode explicar o maior número de irrigações observadas no manejo que utiliza o SMG.

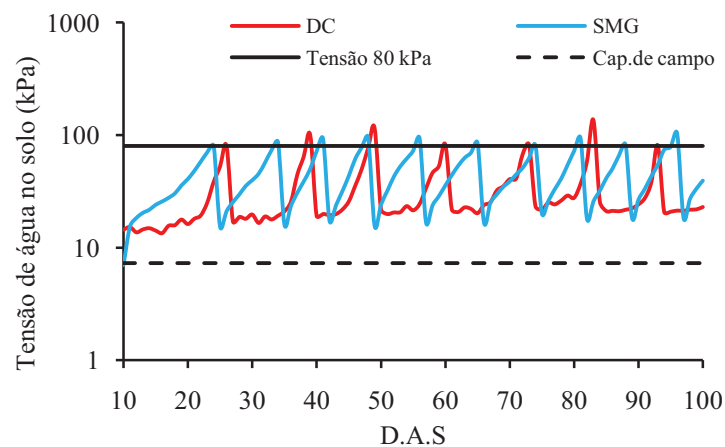


Gráfico 11 Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 80 kPa

Nos Gráficos 12 e 13, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os DC e SMG, respectivamente. A linha horizontal contínua descreve a tensão de referência de 120 kPa.

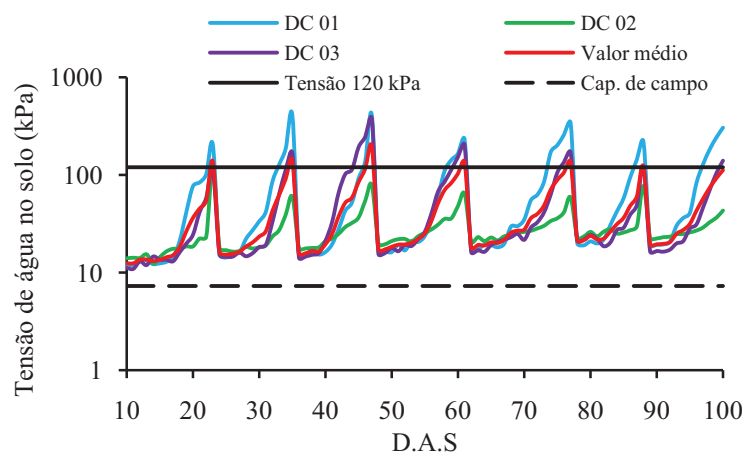


Gráfico 12 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 120 kPa

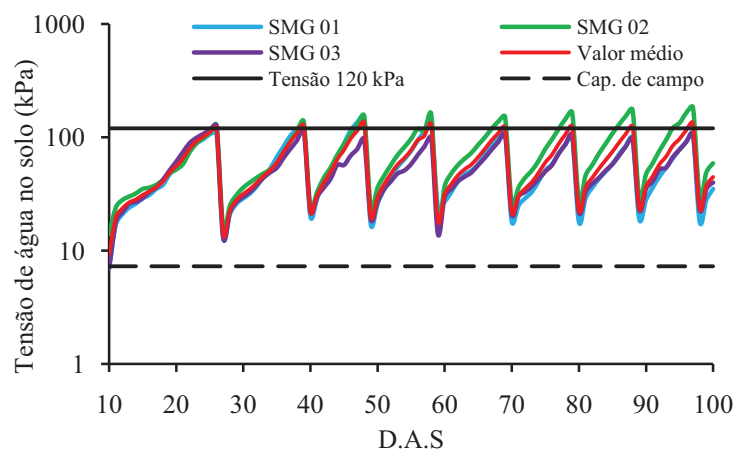


Gráfico 13 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 120 kPa

Ao comparar os dois dispositivos (Gráfico 14) nesse tratamento de 120 kPa, verifica-se que a diferença no número de irrigação foi menor. Isto é, nos tratamentos submetidos às tensões menores, sobretudo, o de 20 kPa, a diferença no volume de água aplicado foi mais expressiva, onde o DC promoveu menor gasto de água.

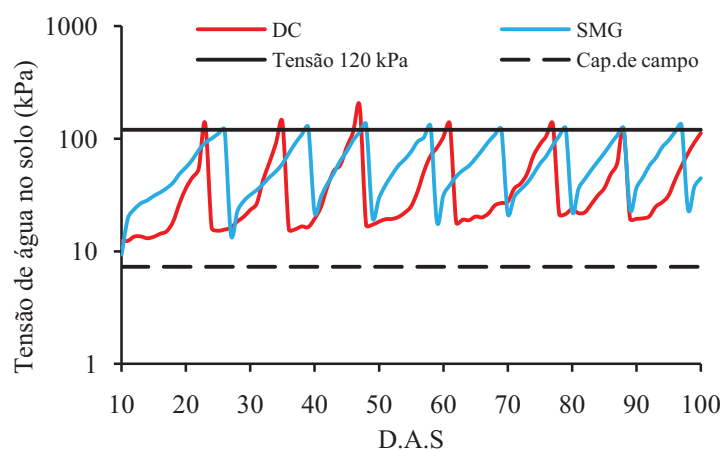


Gráfico 14 Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 120 kPa

Nos Gráficos 15 e 16, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para o DC e SMG, respectivamente. A linha horizontal contínua descreve a tensão de referência de 180 kPa.

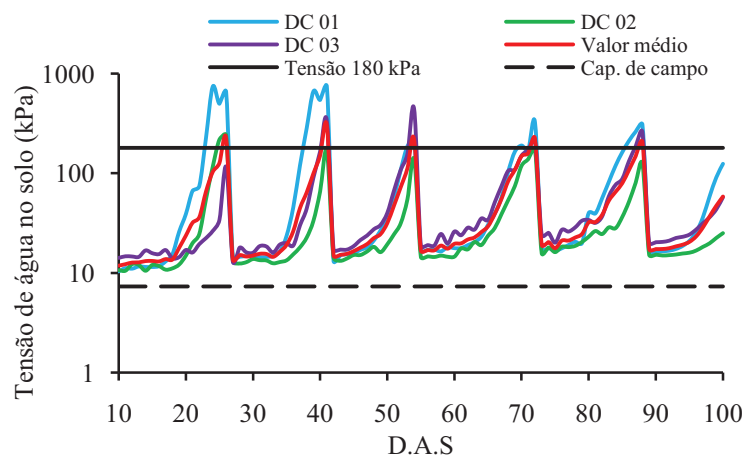


Gráfico 15 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 180 kPa

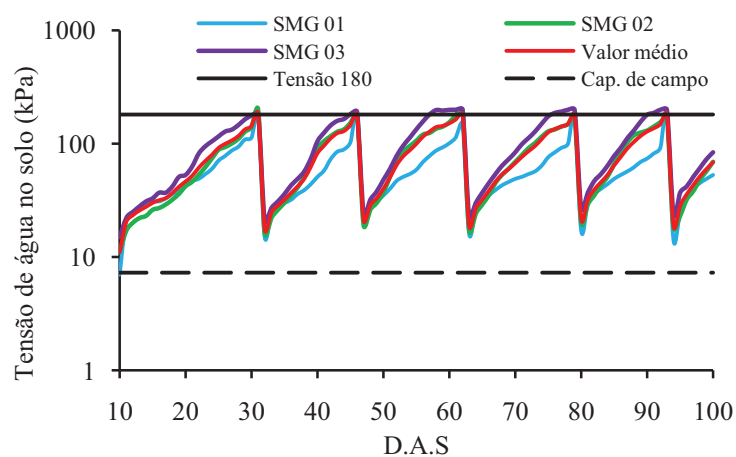


Gráfico 16 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 180 kPa

No Gráfico 17, fica evidente que, somente nesse tratamento de 180 kPa, o número de irrigações, para ambos os dispositivos, foram iguais.

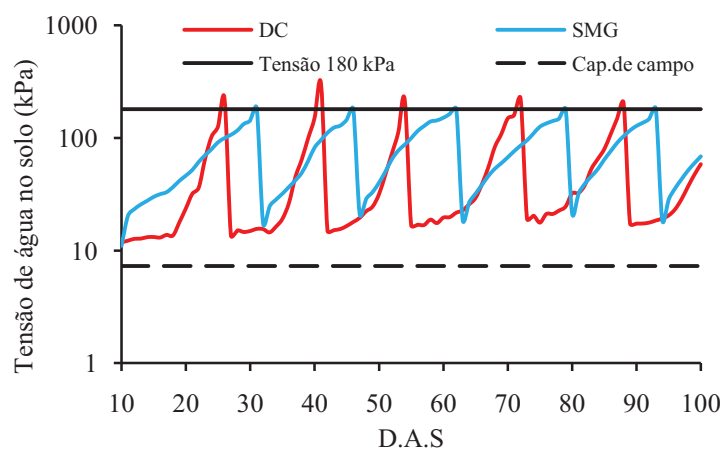


Gráfico 17 Comparação entre as leituras médias dos DC e SMG durante o ciclo da cultura do milho no tratamento de 180 kPa

4.3 Número de irrigação e volume de água aplicado

No Gráfico 18, é mostrado o número de irrigações registrado nas diferentes tensões e dispositivos. Para todo ciclo, observa-se que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, o número de irrigações foi igual somente para o tratamento submetido à tensão de 180 kPa. Para as demais tensões de água no solo, o número de irrigações foi maior utilizando os SMG.

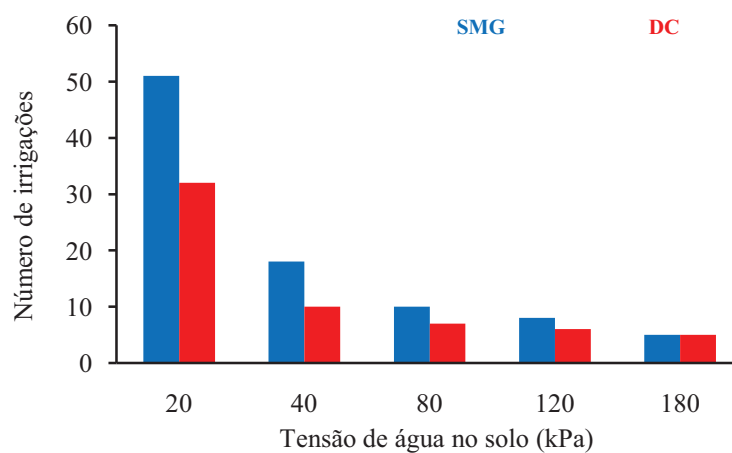


Gráfico 18 Número de irrigações registrado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo

No Gráfico 19, é mostrado o volume de água aplicado para os diferentes tratamentos. O tratamento de 20 kPa, utilizando os SMG, recebeu o maior volume de água em relação aos demais tratamentos.

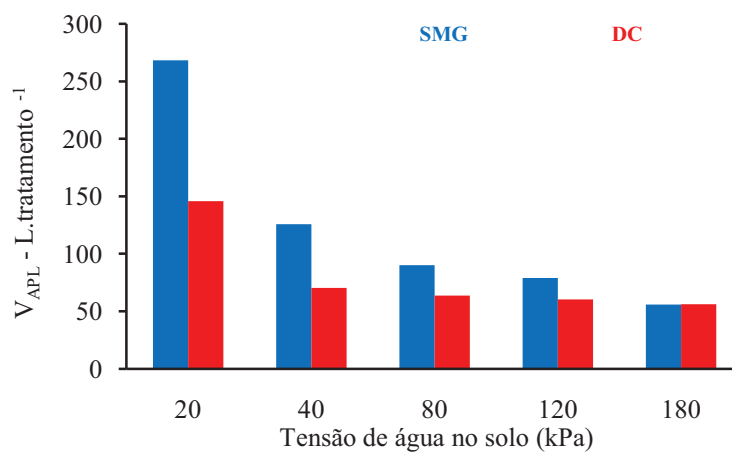


Gráfico 19 Volume de água aplicado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo

Observa-se, na Tabela 1, que o manejo realizado por meio das leituras dos SMG, resultou em um maior volume de água aplicado, exceto o tratamento de 180 kPa, que recebeu 0,53% a menos em relação ao manejo realizado por meio do DC.

Tabela 1 Volume de água aplicado durante a condução do experimento para os diferentes tratamentos de tensão de água no solo e dispositivo

| Tensão (kPa) | Volume de água aplicado (L.tratamento ⁻¹) | | |
|--------------|---|--------|---------------------------|
| | DC | SMG | Excesso em relação DC (%) |
| 20 | 145,76 | 268,35 | 84,10 |
| 40 | 70,23 | 125,65 | 78,91 |
| 80 | 63,58 | 90,14 | 41,77 |
| 120 | 60,37 | 78,98 | 30,83 |
| 180 | 56,12 | 55,82 | -0,53 |

É importante lembrar que todos os SMG foram previamente testados antes de serem instalados no solo. Porém, conforme já mencionado, as leituras de tensão de água no solo realizadas tanto pelo DC quanto pelo SMG, não atingiram o valor da capacidade de campo, mesmo para leituras realizadas após uma irrigação.

4.4 Resumo das avaliações

Na Tabela 2, é apresentado o resumo dos resultados das análises de variância para os seguintes parâmetros: produtividade de grãos (P_G) e eficiência de uso da água (EUA).

Tabela 2 Resumo da análise de variância: produtividade de grãos de milho e eficiência de uso da água em função da tensão de água no solo e dispositivos

| FV | GL | Quadrado Médio | |
|------------------|----|---------------------------------------|--------------------------|
| | | P _G (kg.ha ⁻¹) | EUA (g.L ⁻¹) |
| Blocos | 3 | 4638392,66* | 14,29 ^{ns} |
| Dispositivos (D) | 1 | 91661,47 ^{ns} | 86,35 ^{ns} |
| Tensão (T) | 4 | 6982447,92* | 55,47* |
| Interação (DxT) | 4 | 1102890,96 ^{ns} | 5,29 ^{ns} |
| Resíduo | 27 | 1248888,29 | 6,29 |
| Média Geral | - | 11225,64 | 9,72 |
| CV | - | 9,96 | 25,81 |

*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.

De acordo com os resultados da análise de variância, não houve diferença significativa entre os dispositivos, entretanto, a tensão de água no solo apresentou diferença significativa na produtividade de grãos (P_G) e eficiência de uso da água (EUA). A produtividade de grãos de milho foi maior na tensão de 20 kPa. Entretanto, esse tratamento recebeu, em média, um volume de água 2,11 vezes maior em relação a 40 kPa para um acréscimo de somente 5,06% na produtividade. Na prática, recomenda-se avaliar se o incremento na produtividade compensa, economicamente, a aplicação de mais água pelo sistema de irrigação. No Gráfico 20, é mostrado o comportamento da produtividade de grãos de milho, por meio de uma equação potencial. Schlichting (2012) estudando a cultura do milho submetida a diferentes tensões de água no solo e doses de nitrogênio, obteve melhores resultados (altura de plantas, tamanho de espiga, massa seca da parte aérea) nas tensões de 15 e 25 kPa. Resende, Albuquerque e Couto (2003) recomendam um valor de 70 kPa

para a cultura do milho, considerando a profundidade efetiva do sistema radicular do milho de 0,40 metros.

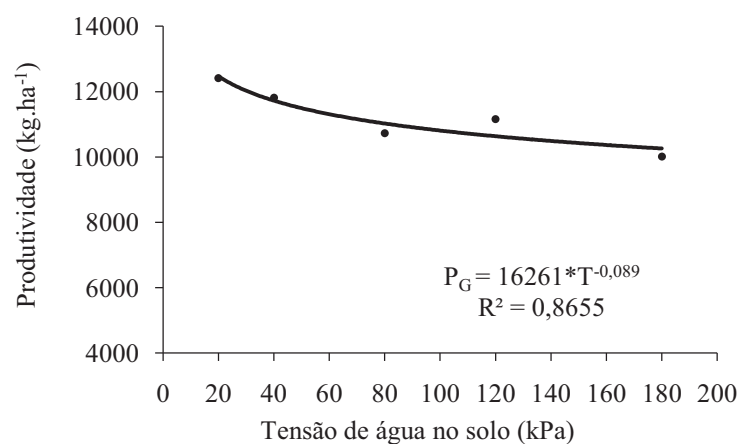


Gráfico 20 Produtividade de grãos de milho BG7051H em função da tensão de água no solo

Para Marouelli et al. (2011), para milho-doce, irrigado com sistema por gotejamento, a tensão crítica varia de 20 a 40 kPa. O Gráfico 21 apresenta o comportamento da EUA em função da tensão de água no solo. De acordo com a equação ajustada, a tensão ótima para a EUA foi de 126 kPa.

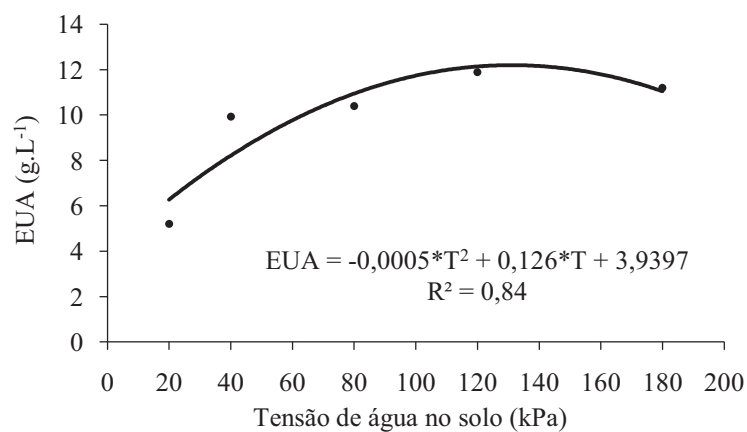


Gráfico 21 Eficiência do uso da água pela cultura do milho em função da tensão de água no solo

4.4.1 Avaliação do dispositivo capacitivo

Após o término deste experimento, os DC foram retirados do solo a fim de se verificar o estado físico do bloco de gesso, contato físico entre solo-dispositivo e possíveis alterações nos eletrodos de cobre. As Figuras 4a e 4b ilustram a interação dos DC com a matriz do solo.

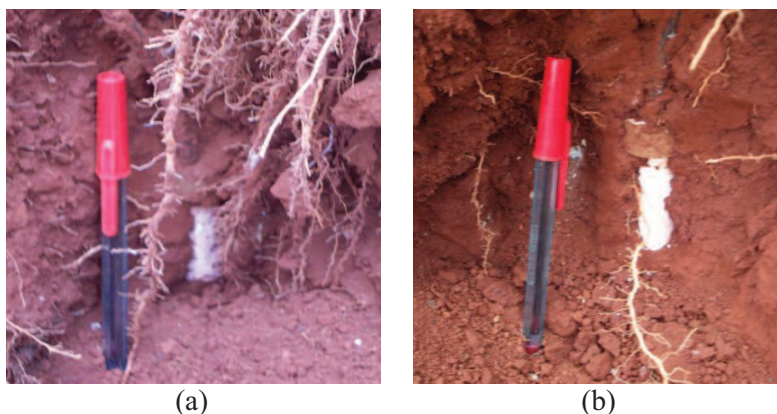


Figura 4 Dispositivo capacitivo em contato com a matriz do solo ao término do experimento com a cultura do milho

De maneira geral, os DC tiveram contato satisfatório com a matriz do solo, pois, em volta do mesmo formou-se uma estrutura coesa. Na superfície do bloco de gesso, foi observado indícios de dissolução devido à presença de algumas raízes ao redor do DC. A Figura 5 ilustra uma amostra do eletrodo (cilindros de cobre) após sua utilização no experimento.

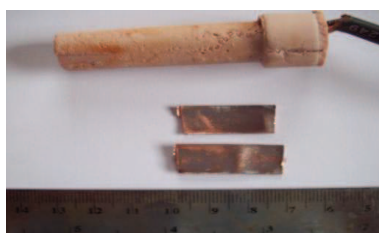


Figura 5 Amostra de cilindro de cobre após término do experimento

A amostra de cobre da Figura 5 apresentou sinais da ocorrência de corrosão. O cobre e as ligas a base de cobre, têm sido utilizados em uma grande variedade de aplicações desde a antiguidade (CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2013). Eles são altamente resistentes à corrosão (NORTON, 2013; CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2013). Porém, conforme destaca Gentil (2012), todos os metais estão sujeitos ao ataque corrosivo, se o meio for suficientemente agressivo. Para Videla (2003), uma superfície metálica em contato com águas industriais ou naturais sofrerá processos químicos, cujo resultado será a corrosão.

Dias (2010) estudando, a corrosão do cobre em amostras inseridas em um litossolo, identificou alterações na morfologia da superfície metálica (Figura 6).

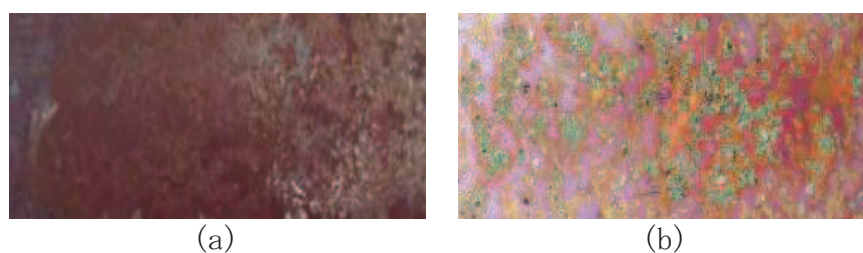


Figura 6 Amostras de cobre após 3 meses de exposição, submetida a 60 % de umidade do solo (a) e condição de saturação (b)

Fonte: Adaptado de Dias (2010)

As amostras de cobre da Figura 6 foram cortadas em chapas retangulares, com uma dimensão aproximada de 80×20 mm e tendo uma espessura média de 2 mm (DIAS, 2010). De acordo com Gentil (2012), o comportamento do solo como meio corrosivo deve ser considerado de grande importância, sendo influenciado por diversas variáveis, dentre elas, condições microbiológicas. Segundo Videla (2003), a corrosão biológica ou biocorrosão pode ser considerada onipresente nos ambientes naturais. A biocorrosão está

diretamente relacionada com a aderência de microrganismos na superfície dos materiais e a sua posterior colonização. Estas estruturas microbianas, denominadas de biofilmes, são constituídas de agregados celulares, material polimérico extracelular resultante do metabolismo microbiano, matéria orgânica e inorgânica e, sobretudo, de água (GALVÃO, 2008).

A Figura 7 refere-se ao resultado da observação em Microscópio Eletrônico de Varredura, dos cilindros de cobre após utilização na condução do experimento do milho. Provavelmente o material observado no ponto 2 seja material biológico, pois, sua composição química foi alterada em relação ao ponto 1. Esse resultado pode ter afetado o comportamento elétrico do DC, pois, as modificações ocorridas na superfície dos eletrodos de cobre (corrosão, biofilme) alteram a condutividade dos metais, assim, o sinal elétrico advindo dos DC possivelmente foi afetado tendo implicações diretas no manejo da água de irrigação.

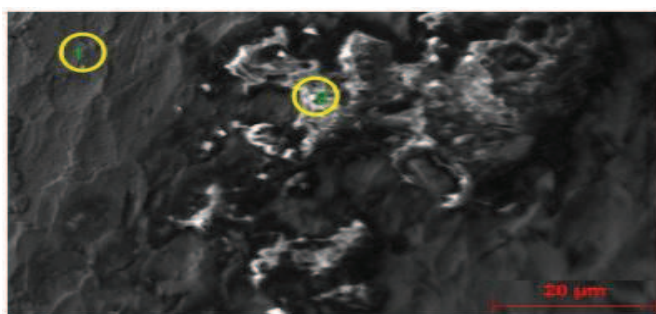


Figura 7 Pontos de observação e análise nos cilindros de cobre após a condução do experimento

A Tabela 3 mostra os resultados de análise da composição química, obtida por Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva, entre o ponto 1 e o ponto 2, os valores estão expressos em percentuais de massa.

Tabela 3 Composição química na superfície do cilindro de cobre observado após a condução do experimento

| Elemento Químico | Ponto 1 | Ponto 2 |
|------------------|---------|---------|
| Carbono | - | - |
| Nitrogênio | 1,930 | - |
| Oxigênio | 15,346 | 49,971 |
| Sódio | - | 7,230 |
| Alumínio | - | 10,899 |
| Silício | - | 5,344 |
| Enxofre | - | 1,626 |
| Cloro | 0,8281 | 2,368 |
| Potássio | - | 1,381 |
| Cálcio | - | 5,768 |
| Ferro | - | 2,324 |
| Cobre | 81,896 | 13,089 |
| Total | 100,000 | 100,000 |

Segundo San, Nazır e Dönmez (2012), a adesão das bactérias e a formação de biofilme são comuns, existindo tanto em ambientes naturais quanto em processos industriais. Para esses autores, o biofilme é uma estrutura heterogênea ligada às bactérias, sendo sistemas biológicos complexos, podendo causar várias alterações químicas na interface metal/biofilme. Na Figura 8, é mostrada a presença da bactéria *Aeromonas salmonicida* na superfície da liga metálica de níquel-cobre em sistemas de tubulação de água.

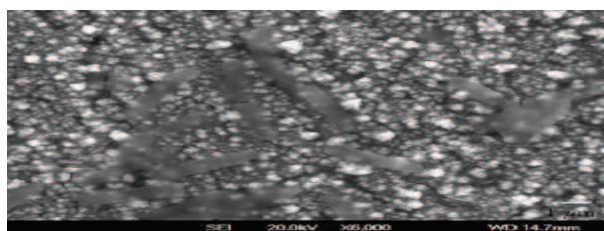


Figura 8 Liga de Ni-Cu contendo *Aeromonas salmonicida*
 Fonte: Adaptado de San, Nazır e Dönmez (2012)

Na Figura 9, são mostrados indícios de formação de biofilme em outra amostra de cilindro de cobre, utilizado neste trabalho.

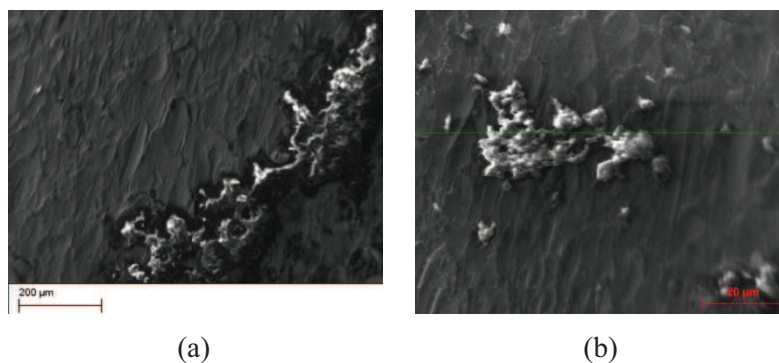


Figura 9 Indícios de formação de biofilme no cilindro de cobre

Pesquisas recentes têm demonstrado que, em solos, o crescimento de microrganismos está relacionado com a energia da água, e é tipicamente expressa como um potencial de água, o qual dá uma visão sobre a atividade microbiana (DECAGON DEVICES, 2011/2012). De acordo com esse boletim informativo, em potenciais matriciais abaixo de -100 kPa, a mobilidade das bactérias cessa, e a partir de -100 MPa, a proliferação de todos os microrganismos é interrompida. Para ter uma ideia dos prejuízos, estima-se que na Grã-Bretanha, 50% dos casos de corrosão em tubulações enterradas se devem a causas microbiológicas. Avaliação realizada nos Estados Unidos, no final da década de 70, revela que o prejuízo causado pela biocorrosão foi da ordem de 60 bilhões de dólares por ano (VIDELA, 2003).

Diante do exposto, pode-se afirmar que a atividade dos microrganismos, sobretudo, na superfície metálica de sensores de umidade do solo, deve ser pesquisada, pois, os sinais elétricos provenientes destes sensores podem sofrer alterações significativas ao longo do tempo comprometendo o manejo da irrigação.

5 CONCLUSÕES

- a) Tanto os dispositivos capacitivos quanto os sensores de matriz granular não registraram leituras relativas à capacidade de campo após a irrigação;
- b) Os cilindros de cobre, utilizados na construção dos dispositivos capacitivos, apresentaram indícios de corrosão após sua utilização no experimento, provavelmente, em decorrência de atividade microbiológica;
- c) Excetuando-se o tratamento submetido à tensão de água no solo de 180 kPa, o manejo da irrigação realizado por meio das leituras dos sensores de matriz granular proporcionou maior número de irrigações e, por conseguinte, maior volume de água aplicado;
- d) Observou-se que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, a produtividade de grãos de milho foi maior na faixa de 20 a 40 kPa.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BUSATO, C. C. M. et al. Chuva sob medida. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 10, n. 120, p. 16-22, jul. 2012.
- CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 820 p.
- CARPENA, R. M. et al. Field comparison of tensiometer and granular matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. **Hort Technology**, Alexandria, v. 15, n. 3, p. 584-590, July/Sept. 2005.
- COSTA, J. R.; PINHO, J. L. N.; PARRY, M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 443-450, mar. 2008.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p.1862-1866, nov./dez. 2007.
- DECAGON DEVICES. **Soil & Plant Water Potential Newsletter**, Washington, v. 1, p. 6-9, 2011/2012. Disponível em:<
<http://www.decagon.com/education/soil-and-plant-water-potential-newsletter-2011-2012/>>. Acesso em: 28 out. 2013.
- DIAS, C. A. D. B. **Corrosão do cobre em amostras de solo de diferentes graus de agressividade**. 2010. 77 p. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.
- EIRA, 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.

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.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Crop yield response to water**. 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e.pdf>>. Acesso em: 3 out. 2013.

GALVÃO, M. M. **Efeito do potencial de proteção catódica na corrosão microbiologicamente induzida**. 2008. 104 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012. 360 p.

HOEFT, R. G. et al. **Modern corn and soybean production**. Champaign: MCSP Publication, 2000. p. 353.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE: estatística da produção agrícola**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201308.pdf>. Acesso em: 2 out. 2013.

MARQUELLI, W. A. et al. Manejo da água de irrigação. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 157-232.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Produção de milho em sistema irrigado. In: PEREIRA FILHO, I. A. (Ed.). **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p. 205-244.

PINTO, N. F. J. A.; OLIVEIRA, E.; FERNANDES, F. T. **Manejo das principais doenças do milho**. Belo Horizonte: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 16 p. (Circular Técnica, 92).

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed.). Manejo de irrigação. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p. 265-302.

SAN, N. O.; NAZIR, H.; DÖNMEZ, G. Microbiologically influenced corrosion failure analysis of nickel–copper alloy coatings by *Aeromonas salmonicida* and *Delftia acidovorans bacterium* isolated from pipe system. **Journal of Engineering Failure Analysis**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 63-70, Oct. 2012.

SCHLICHTING, A. F. **Cultura do milho submetida a diferentes tensões de água no solo e doses de nitrogênio**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Mato Grosso, Rondonópolis, 2012.

VIDELA, H. A. **Biocorrosão, biofouling e biodeterioração**. São Paulo: E. Blücher, 2003. 148 p.

CAPÍTULO 4 Manejo da irrigação utilizando leitor watermark[®] e dispositivo capacitivo

RESUMO

Nos últimos 10 anos, a Engenharia Eletrônica e a Ciência de Materiais têm avançado de maneira surpreendente, colaborando para o desenvolvimento de novos tipos de sensores e instrumentos mais confiáveis. Em áreas irrigadas, tais dispositivos têm favorecido o controle mais adequado da aplicação de água para as plantas permitindo economia de água e energia. Atualmente, tem-se usado muito o Sensor de Matriz Granular (SMG) no manejo da irrigação, pois, é fácil de instalar, requer pouca manutenção e pode ser integrado em sistemas de sensores sem fio. Apesar dos benefícios mencionados, no Brasil, tais sensores ainda são relativamente caros, devido aos tributos de importação. Assim, com o objetivo de buscar soluções para o manejo da irrigação, propôs-se, por meio deste trabalho, comparar os Dispositivos Capacitivos (DC) com os (SMG) no monitoramento da tensão de água no solo, no cultivo do trigo, usando o leitor Watermark[®]. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 4, sendo dois dispositivos (DC e SMG), quatro valores de tensão de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 140 kPa) e três blocos, totalizando vinte e quatro parcelas experimentais. Durante o experimento, observou-se que o manejo da irrigação utilizando o DC e o leitor Watermark[®] proporcionou menor número de irrigação e volume de água aplicado em relação aos tratamentos monitorados via SMG. Entretanto, notou-se que ao longo do tempo, os valores de tensão de água no solo, registrado por alguns DC aumentavam progressivamente não atingindo a capacidade de campo, sendo necessário analisar a viabilidade do reuso de ambos os dispositivos no manejo da irrigação. Independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, os parâmetros: produtividade de grãos, número de grãos por espiga e massa seca da parte aérea não apresentaram, estatisticamente, diferença significativa.

Palavras - chave: Eletrônica embarcada. Irrigação de precisão. Trigo irrigado.

ABSTRACT

Over the past 10 years, electronic engineering and materials science has progressed surprisingly, contributing to the development of new types of sensors and more reliable instruments. In irrigated areas, such devices have favored the most adequate control of water application to plants allowing water and energy savings. Currently, the Granular Matrix Sensor (GMS) has been commonly used in irrigation management, as it is easy to install, requires little maintenance and can be integrated into wireless sensor systems. Despite the benefits mentioned, in Brazil, such sensors are relatively expensive due to import taxes. Thus, with the aim of finding solutions to irrigation management, the purpose of this study is to compare the Capacitive Devices (CD) with the GMS in the monitoring of soil water tension in the cultivation of wheat, using the Watermark[®] reader. The experimental design was a randomized block factorial 2 x 4 with two devices (CD and GMS), four values of soil water tension (20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 140 kPa) and three blocks, totaling twenty four experimental plots. During the experiment, it was observed that the irrigation management using the CD and Watermark[®] reader provided a smaller amount of irrigation and quantity of water applied in relation to the monitored treatments via GMS. However, it was noted that over time, the values of soil water tension recorded by some CD increased progressively, reaching no field capacity, making it necessary to analyze the feasibility of the reuse of both devices in irrigation management. Regardless of the device used in the management of irrigation parameters (grain yield, number of grains per spike and the dry weight of shoots) no significant differences were presented statistically.

Keywords: Embedded electronics. Precision irrigation. Irrigated wheat.

1 INTRODUÇÃO

A despeito da complexidade na determinação das grandezas físicas, no ambiente agrícola, o uso de sensores e instrumentos eletrônicos tem auxiliado pesquisadores e produtores rurais a obter dados em tempo real de variáveis quantitativas que podem ser utilizadas para monitorar e/ou controlar determinado processo produtivo. Com o uso de técnicas de microprocessamento, eletrônica embarcada e de sensores, o processamento automático e o armazenamento dos dados se tornaram cada vez mais atrativos.

Nos últimos 10 anos, a engenharia e a ciência de materiais têm avançado de maneira surpreendente, colaborando para o desenvolvimento de novos tipos de sensores e instrumentos mais confiáveis. Em áreas irrigadas, tais dispositivos podem favorecer o controle mais adequado de aplicação de água para as plantas permitindo economia de água e energia. Dessa forma, a agricultura irrigada aponta para a inovação e incorporação da tecnologia como ferramentas indispensáveis para a competitividade e sustentabilidade em resposta à produção crescente de alimentos, no qual o trigo merece destaque.

O trigo, um dos cereais básicos utilizados na alimentação humana, é uma das *commodities* agrícola mais importante no comércio mundial de grãos devido à crescente demanda da população por seus derivados. Estima-se que a demanda global por grandes grãos, dentre eles o trigo (*Triticum aestivum L.*), está projetada para aumentar em 70% até 2050. Para o Brasil, a produção nacional de trigo passa a ter um caráter estratégico no comércio internacional, em virtude de ser um dos grandes importadores deste cereal. Na safra 2012/2013, o país importou mais de sete milhões de toneladas de trigo o que representou a saída de US\$ 2,200 bilhões do país. Dada à importância do trigo, em âmbito nacional, direcionamentos no sentido de aumentar a produtividade por meio do manejo adequado da irrigação, devem ser fomentados. Assim, com

o objetivo de buscar soluções para o manejo da irrigação propôs-se, por meio deste trabalho, comparar os dispositivos capacitivos (DC) com os sensores de matriz granular (SMG) no monitoramento da tensão de água no solo e controle da irrigação, no cultivo do trigo, usando o instrumento de medição Watermark[®].

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sensores de matriz granular

No contexto da gestão dos recursos hídricos, sobretudo, em áreas irrigadas, o monitoramento da umidade ou do estado da água no solo é um componente essencial para garantir aumento de produtividade de maneira sustentável. Dentre os vários dispositivos existentes, os eletrométricos merecem destaque, pois, fornecem dados quantitativos das grandezas de interesse em tempo real.

Ao longo dos últimos anos, tem-se usado muito sensor de matriz granular (SMG) para estimar a umidade do solo (LAILHACAR; DUKES, 2010). De acordo com Lailhacar e Dukes (2010), o SMG é um dispositivo que mede a resistência eléctrica do solo, a qual é convertida em leituras de tensão de água no solo. Desde o desenvolvimento do SMG, muitos pesquisadores o têm utilizado no manejo da irrigação nos cultivos: da cebola (SHOCK; FEIBERT; SAUNDERS, 1998a), batata (SHOCK; FEIBERT; SAUNDERS, 1998b) e tomate (HANSON; ORLOFF; PETERS, 2000; LÓPEZ et al., 2013).

Segundo Terzis et al. (2010), Thompson et al. (2007) e Vellidis et al. (2008), os SMG são baratos, fáceis de instalar, fornecem resultados confiáveis, requerem pouca manutenção e podem ser integrados em sistemas de sensores sem fio. Apesar dos benefícios mencionados, no Brasil, tais sensores ainda são relativamente caros, devido os tributos de importação. Para o manejo da irrigação de grandes culturas, como o trigo, o uso desses sensores pode ser inviável devido ao número de SMG necessário para monitorar grandes áreas de cultivo.

2.2 Cultura do trigo

O trigo, cujo nome científico é *Triticum aestivum*, é uma planta da família das gramíneas, assim como o arroz e o milho, e se originou do cruzamento de outras gramíneas silvestres que existiam nas proximidades dos rios Tigre e Eufrates, na Ásia, por volta de 15 mil a 10 mil anos antes de Cristo (SILVA et al., 1996). Seu grupo possui mais de 30 espécies, e estas se desdobrando em mais de 30.000 variedades. No total, existem 14 espécies de trigo de valor comercial, das quais três (*Triticum aestivum*, *Triticum durum* e *Triticum compactum*) cobrem praticamente 90% da produção mundial (GARCIA, 2011). Entretanto, destaca Garcia (2011) que, no Brasil, a espécie mais consumida é a *Triticum aestivum*, muito usada na panificação e confeitaria. O trigo foi introduzido, no Brasil, em 1534, por Martim Afonso de Souza, na Capitania de São Vicente, hoje Estado de São Paulo (SILVA et al., 1996).

Segundo Soares Sobrinho et al. (2011), o trigo é a cultura com maior participação no comércio internacional de grãos e a segunda em quantidade produzida (cerca de 670 milhões de toneladas na safra 2011/2012), correspondendo a quase 30% da produção mundial de grãos. De acordo com Furlan (2013), o consumo interno brasileiro, em 2012, foi de 10,4 milhões de toneladas, sendo que a produção nacional atingiu cerca de 5 milhões de toneladas, deixando o Brasil em situação desfavorável diante dos países produtores, tornando o país o 5º maior importador de trigo.

De acordo com Soares Sobrinho et al. (2011), apenas Minas Gerais, que produz 3,8% de sua capacidade de moagem, poderia produzir cerca de 200 mil toneladas, se 25% de seus 150 mil hectares irrigados fossem destinados à cultura de trigo. Para Oliveira (2009), o cultivo do trigo irrigado ainda não é expressivo, sendo, uma das possíveis causas da grande quantidade importada, pois, a maior parte do trigo nacional provém de culturas de sequeiro que sofrem frequentes

estresses hídricos. Segundo Camargo e Ferreira Filho (2000), no Planalto Central (incluindo norte de São Paulo) o trigo irrigado, de inverno, encontra ótimas condições de clima: umidade relativa baixa, alta insolação, ausência de geadas e tempo seco durante a colheita.

Em Minas Gerais, o plantio do trigo aparece como uma boa alternativa para o período de inverno, em função das baixas temperaturas coincidirem com o desenvolvimento vegetativo. Porém, devido a uma menor precipitação, na estação outono/inverno, a cultura está sujeita à deficiência hídrica, havendo, portanto, a necessidade de efetuar a complementação com irrigação a fim de suprir as necessidades hídricas da cultura para que elevadas produções de grãos de trigo sejam alcançadas. Destarte, a irrigação é uma prática indispensável para permitir o cultivo na época seca. Assim, com o intuito de reduzir a importação, a irrigação deve ser tratada como uma estratégia capaz de aumentar a produção, sobretudo, em regiões agrícolas onde o cultivo do trigo ainda não é tradicional. Neste contexto, surge a necessidade de informações quanto ao manejo adequado do solo e da água de irrigação para estas regiões.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em casa de vegetação do tipo arco, próximo ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, na cidade de Lavras – Minas Gerais. A casa de vegetação está localizada nas seguintes coordenadas geográficas: 21° 13' 46'' de latitude Sul e 44° 58' 36'' de longitude Oeste e altitude de 870 metros. Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta um clima Cwa, ou seja, clima temperado suave, chuvoso, com inverno seco (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007). O registro da temperatura e da umidade relativa foi realizado com auxílio de um termo-higrômetro digital modelo HT-600 da Instrutherm. A montagem do sistema de irrigação, bem como a calagem, adubação e preparo do solo, tiveram início no dia 15/03/2013. A semeadura foi realizada no outono, no dia 04/04/2013 e a colheita no dia 22/07/2013, totalizando 109 dias.

3.2 Solo utilizado no experimento

Amostra composta de solo foi coletada no interior da casa de vegetação na camada subsuperficial (de 0,10 m a 0,30 m de profundidade) para análise física e química. Tais análises foram realizadas nos Laboratórios de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. Na Tabela 1, é apresentado o resultado da análise física para classificação textural do solo. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (LVd) segundo o novo sistema hierarquizado (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA, 2006) de classe textural argilosa.

Tabela 1 Granulometria e classificação textural do LVd

| Identificação | Areia | Silte | Argila | Classe Textural |
|---------------|--------|-------|--------|-----------------|
| | dag/kg | | | |
| LVd | 9 | 24 | 67 | Argilosa |

Na Tabela 2, encontra-se o resultado dos parâmetros químicos do LVd, no qual foi cultivado o trigo.

Tabela 2 Resultado da análise química do LVd da área experimental

| Siglas | Descrição | Unidade | Determinação |
|------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------|
| pH | pH do Solo | - | 5,30 |
| P | Fósforo | mg.dm ⁻³ | 2,00 |
| K | Potássio | mg.dm ⁻³ | 82,00 |
| Na | Sódio | mg.dm ⁻³ | - |
| Ca ²⁺ | Cálcio | cmol.dm ⁻³ | 2,70 |
| Mg ²⁺ | Magnésio | cmol.dm ⁻³ | 0,70 |
| Al | Alumínio | cmol.dm ⁻³ | 0,00 |
| H+Al | Acidez Potencial | cmol.dm ⁻³ | 2,32 |
| SB | Soma de bases | cmol.dm ⁻³ | 3,61 |
| (T) | CTC a pH 7,0 | cmolc.dm ⁻³ | 5,93 |
| t | Capacidade de troca catiônica efetiva | cmol.dm ⁻³ | 3,61 |
| Prem | Fósforo remanescente | mg.L ⁻¹ | 4,44 |
| V | Saturação de bases | % | 60,88 |
| m | Saturação por alumínio | % | 0,00 |
| MO | Matéria orgânica | dag.Kg ⁻¹ | 2,87 |
| Zn | Zinco | mg.dm ⁻³ | 2,11 |
| Fe | Ferro | mg.dm ⁻³ | 29,45 |
| Mn | Manganês | mg.dm ⁻³ | 39,38 |
| Cu | Cobre | mg.dm ⁻³ | 5,31 |
| B | Boro | mg.dm ⁻³ | 0,19 |
| S | Enxofre | mg.dm ⁻³ | 34,91 |

Na Tabela 3, encontram-se os pares de pontos da curva característica de retenção de água no solo.

Tabela 3 Pontos da curva característica de retenção de água do solo da área experimental

| Amostra | Tensão de água no solo (kPa) | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 33 | 100 | 500 | 1500 | |
| (0,10-0,30) | $\Theta - \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ | | | | | | | | | |
| | 0,569 | 0,451 | 0,39 | 0,354 | 0,332 | 0,289 | 0,269 | 0,246 | 0,244 | |

Os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo, descrita no Gráfico 1, foram obtidos com o auxílio do aplicativo *Solver* do programa Microsoft Excel[®], baseados no modelo proposto por Genuchten (1980).

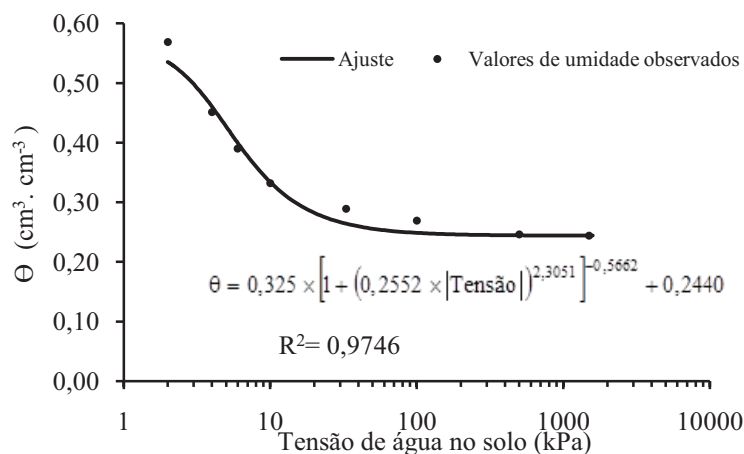


Gráfico 1 Curva característica de retenção de água no solo

3.3 Calibração dos dispositivos capacitivos

Inicialmente, em três recipientes de plásticos, foram efetuados 45 furos com agulha metálica de 500 μm de diâmetro. Em seguida determinou-se a massa de cada um dos recipientes. Terminada essa etapa, três amostras de terra fina secas ao ar (TFSA) foram distribuídas nesses recipientes e determinada a massa

desse conjunto (recipiente + TFSA). Após esse procedimento, as amostras foram saturadas com água destilada e homogeneizadas. Em cada recipiente foi inserido um DC (similarmente ao descrito no Capítulo 1). Os recipientes foram vedados com lona plástica para não ocorrer a evaporação da água. Após um período de 48 horas, iniciaram-se as medidas de tensão de água no solo (kPa) por meio do medidor Watermark[®], modelo 30-KTCD-NL. No final de 30 dias, retirou-se três subamostras de cada recipiente para determinação da umidade do solo (determinada pelo método padrão de estufa) e correlacionada com os valores de tensão de água no solo (via leitor Watermark[®]). **Delineamento Experimental**

Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 4, sendo 2 dispositivos (DC e SMG) e 4 valores de tensão de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 140 kPa) e 3 blocos, totalizando 24 parcelas experimentais (Figura 1). Neste experimento, foram utilizados 12 DC e 12 SMG. Antes de instalar tais dispositivos, esses foram saturados com água durante 48 horas. Após esse procedimento, realizou-se a instalação no solo a uma profundidade média de 0,17 m. As leituras da tensão de água no solo foram coletadas diariamente por meio do leitor Watermark[®].

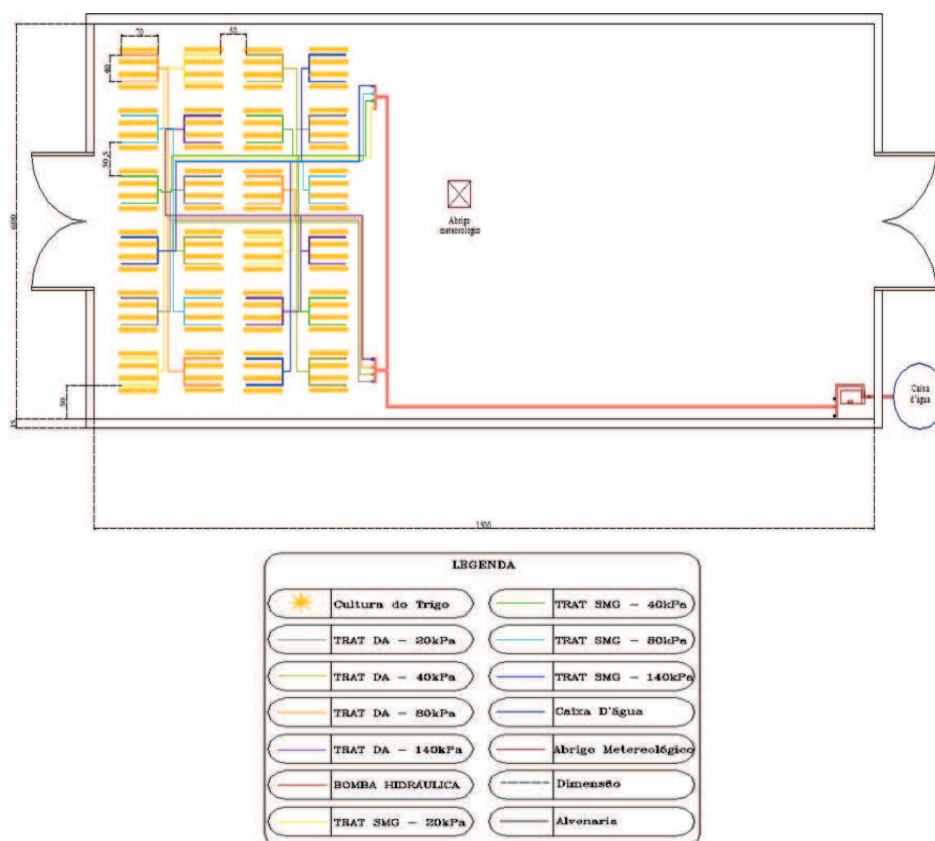


Figura 1 Croqui da área experimental

3.5 Adubação

Diante dos resultados da análise química do solo, verificou-se que o pH estava abaixo do recomendado para a cultura do trigo. No dia 15/03/2013, aplicou-se o equivalente a 1,13 ton.ha⁻¹ de calcário Filler. Antes da sementeira (25/03/2013), foi aplicado o equivalente a 286 kg.ha⁻¹ de NPK (08-28-16). Aplicou-se também, o equivalente a 3 kg.ha⁻¹ de sulfato de zinco e 1,3 kg.ha⁻¹ de ácido bórico.

3.6 Sistema de irrigação

Adotou-se o sistema de irrigação localizada com gotejadores autocompensantes com vazão de 2 L. h⁻¹. A linha de derivação teve início no cabeçal de controle sendo composto por fonte de água pressurizada por conjunto motobomba modelo - BC 91S da Schneider e potência de ¾ CV. Os gotejadores foram conectados sobre as linhas laterais. Estas linhas foram construídas no formato de “U”, nas quais foram conectados 6 gotejadores. Após a montagem do sistema de irrigação, realizou-se a avaliação da uniformidade de vazão, através da equação (1).

$$CU = \left(\frac{q_{25\%}}{q_{média}} \right) \quad (1)$$

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 este experimento, o CU foi de 0,9072. Este resultado está de acordo com os valores recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT (1986).

3.7 Instalação do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação com 6 metros de largura e comprimento de 19 metros, do tipo arco com estrutura metálica, cobertura de plástico e sombrite nas laterais. As dimensões das parcelas

experimentais foram 0,68 x 0,70 metros com espaçamentos entre as parcelas de 0,30 metros (Figura 2). Cada parcela experimental foi constituída de 4 linhas de plantio. Para avaliação, foram consideradas as plantas localizadas nas duas linhas internas da parcela experimental. As duas linhas externas serviram como bordadura.

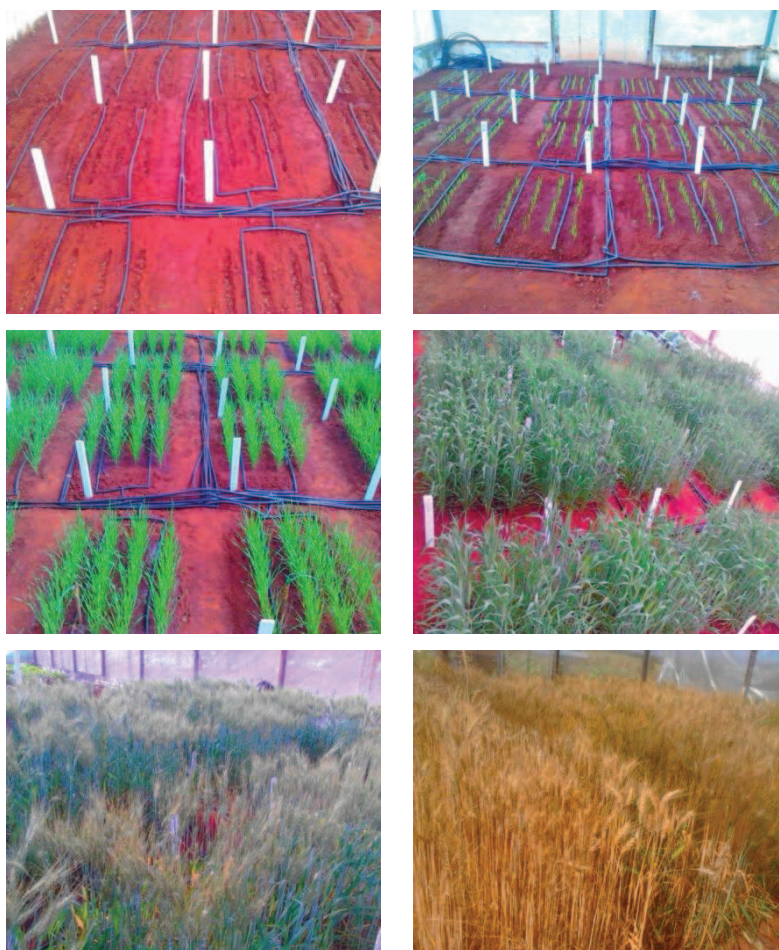


Figura 2 Fotos da área experimental durante a condução do experimento com a cultura do trigo

3.8 Semeadura e manejo inicial

Após a montagem e teste do sistema de irrigação, com o solo na capacidade de campo, foi semeado o equivalente a 67 plantas por metro linear, a uma profundidade de 3 cm. A emergência ocorreu aos 4 dias após a semeadura (DAS). Todas as parcelas experimentais receberam o mesmo volume de água, correspondente à capacidade de campo até os 14 DAS. A partir dos 15 DAS, iniciou-se a diferenciação entre os tratamentos.

3.9 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado com base na curva característica de retenção de água no solo e leitura média do DC e SMG. Foram instalados 3 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 por meio do leitor Watermark[®]. Os valores médios obtidos eram interpolados numa planilha, na qual, havia os valores previamente correlacionados de tensão de água no solo com a umidade volumétrica do solo. Todas as leituras foram realizadas diariamente no período da tarde.

Para o presente experimento, o volume de solo explorado pela cultura do milho foi de 166,60 Litros (espaçamento de 0,68 m x 0,7 m e profundidade efetiva do sistema radicular de 0,35 m). O volume de água a ser aplicado pela irrigação foi calculado utilizando a equação (2).

$$V = (\theta_{cc} - \theta_{trat}) \times V_{solo} \quad (2)$$

Em que:

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

Θ_{cc} = 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 Litros.

3.10 Cultivar de trigo

Utilizou-se a cultivar BRS 254, identificada como trigo Melhorador. Tal cultivar atende ao mercado de farinha de trigo. Seu cultivo é indicado para Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal e Bahia. O plantio em regiões com altitude acima de 900 metros e regiões com clima quente tem demonstrado bons resultados na produtividade. As sementes utilizadas foram fornecidas pelo Departamento de Agricultura da Ufla (DAG/UFLA).

3.11 Práticas culturais

Ao longo do ciclo do trigo, foi realizada a capina manual nas parcelas experimentais quando pertinente. Foram realizadas inspeções visuais para identificar possíveis pragas e/ou ocorrência de doenças. Tais informações serviram de suporte na tomada de decisão referente à necessidade de correções nutricionais e controle fitossanitário.

3.12 Controle fitossanitário e adubação de cobertura

Foi observado, aos 25 DAS, em algumas plantas de trigo, a presença de lagarta-militar. Para o controle desta praga foi aplicado, no dia seguinte, o inseticida Lebaycid 500, na concentração de 1 mL/1 Litro de água. Outra dose deste produto foi aplicada aos 69 DAS. Para o suprimento de nitrogênio, aplicou-se o equivalente a $195 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de ureia. Tal aplicação foi parcelada em

três doses, sendo: 75 kg.ha⁻¹ aos 25 DAS, 75 kg.ha⁻¹ aos 41 DAS e o restante aos 70 DAS.

3.13 Avaliações

Foram avaliados, ao longo deste experimento, o comportamento do DC (dispositivos novos) em relação às leituras de tensão de água no solo e a viabilidade de uso no manejo da irrigação em comparação com o SMG. Foram avaliados também, o número de irrigações, o volume de água aplicado, a produção de grãos secos, a matéria seca da parte aérea e o número de grãos por espiga para os diferentes dispositivos e nas diferentes tensões de água no solo.

3.13.1 Produtividade de grãos secos e matéria seca

Para estimar a produtividade de cada tratamento, foram coletados grãos de 60 plantas de cada parcela experimental. A massa de grãos secos (13% b.u) foi determinada utilizando o método padrão de estufa. Amostras da parte aérea de 60 plantas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas ao laboratório para determinação da matéria seca. Tais amostras foram colocadas em estufa com ventilação de ar forçada sob uma temperatura de 65 °C por 48 horas.

3.13.2 Eficiência do uso da água

Foi relacionado à produção média de grãos de cada parcela com o volume médio consumido, a fim de calcular a eficiência do uso da água (g.L⁻¹).

3.13.3 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 DISCUSSÃO

4.1 Correlação tensão de água no solo x umidade do solo

No Gráfico 2, são apresentados os dados observados e o ajuste entre os valores de tensão de água no solo (kPa) e as umidades volumétricas do solo utilizados neste experimento e obtidos por meio dos DC.

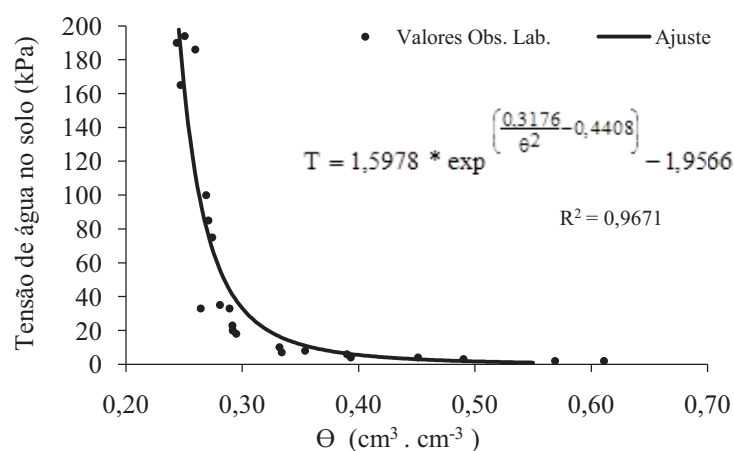


Gráfico 2 Tensão de água no solo obtido por meio das leituras nos DC

Importante ressaltar que o limite superior de tensão de água no solo é de 199 kPa, sendo esse o valor de fundo de escala do medidor Watermark®.

4.2 Caracterização das condições climáticas da casa de vegetação

No Gráfico 3, são apresentadas as variações diárias da umidade relativa do ar, máxima, média e mínima no interior da casa de vegetação.

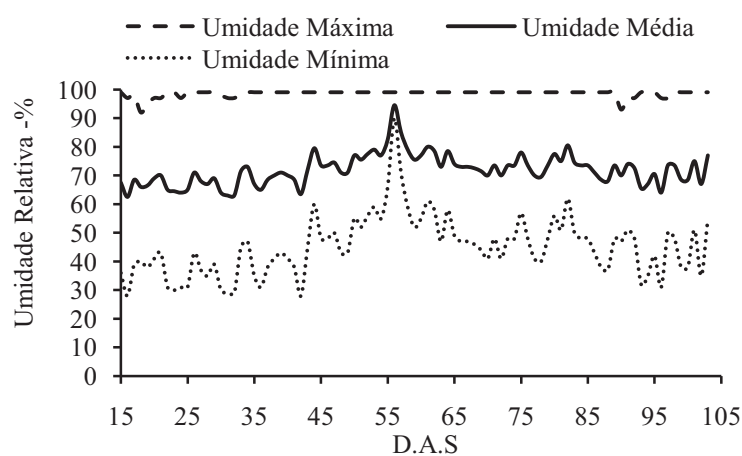


Gráfico 3 Valores diários máximos, médios e mínimos da umidade do ar observados durante o experimento

A umidade relativa média, ao longo deste experimento, no interior da casa de vegetação, foi de 71,88%. De acordo com Fronza et al. (2007), a umidade relativa do ar baixa (< 40%) associada a altas temperaturas (>30 °C), na fase de meiose até a floração, provocam a inviabilidade do pólen.

No Gráfico 4, são apresentadas as variações diárias da temperatura, máxima, média e mínima no interior da casa de vegetação.

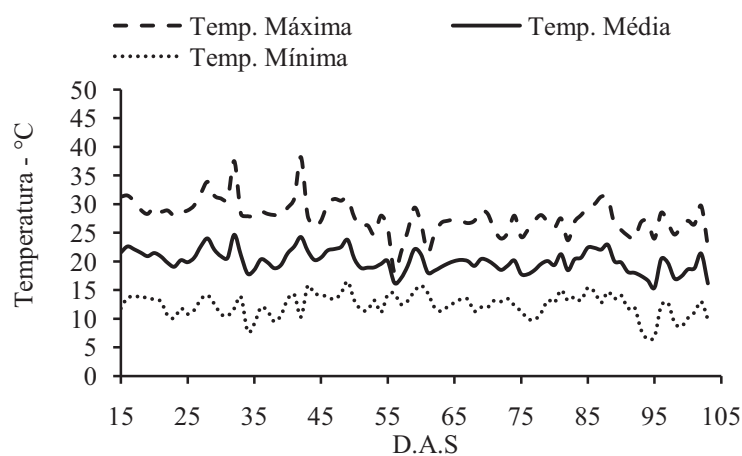


Gráfico 4 Valores diários máximos, médios e mínimos de temperatura do ar observados durante o experimento

Importante destacar que, as regiões brasileiras onde o trigo é cultivado caracterizam-se por serem regiões pouco frias, se comparadas às regiões tritícolas tradicionais dos principais países produtores. Entretanto, o cultivo de trigo com irrigação pode ser efetuado em quase toda região do cerrado do Brasil central, em áreas com altitude superior a 400 metros (MORESCO et al., 2013). Segundo Osório (1992), temperaturas muito elevadas são prejudiciais na fase inicial de desenvolvimento do trigo, por reduzirem o perfilhamento e o tamanho das espigas. Souza e Pimentel (2013) mencionam a importância da temperatura no processo fotossintético. Para esses autores, a fotossíntese, na planta de trigo, atinge sua eficiência máxima entre 22 e 25 °C e diminui bruscamente acima de 35 °C. Neste experimento, a temperatura média do ar, ao longo do experimento, foi de 20,06 °C, bem próximo da faixa recomendada.

4.3 Dispositivos empregados no manejo da irrigação

Nos Gráficos 5 e 6, são mostrados os valores diários de tensão de água no solo, para os DC e SMG, respectivamente. A linha horizontal tracejada representa o valor da capacidade de campo (5 kPa) e a linha horizontal contínua descreve a tensão de referência de 20 kPa. A irrigação foi realizada toda vez que as leituras médias de tensão (linha contínua vermelha) estavam acima da linha de referência.

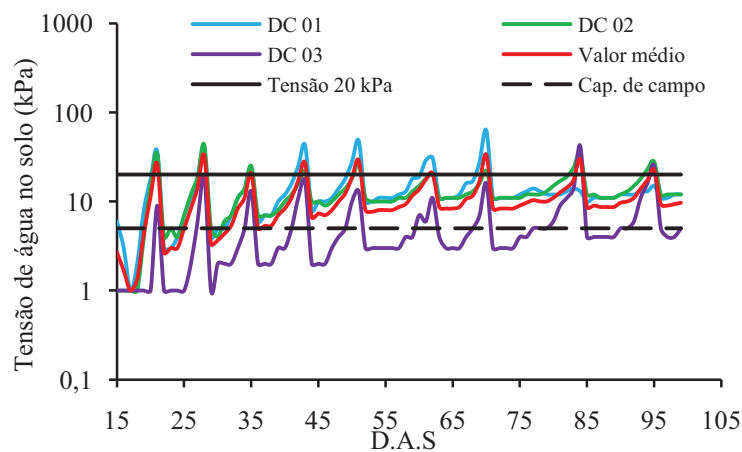


Gráfico 5 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 20 kPa

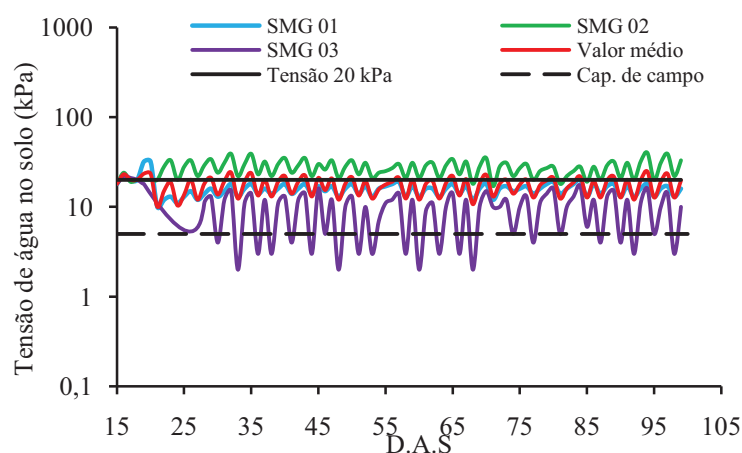


Gráfico 6 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 20 kPa

Verificou-se, no Gráfico 5, que ao realizar uma irrigação, as leituras médias de tensão de água no solo, obtidas por meio dos DC, atingiram o valor da capacidade de campo até os 36 DAS, após esse período, somente o DC 03 registrou o valor da tensão na capacidade de campo. Comportamento similar ocorreu no tratamento monitorado pelos SMG (Gráfico 6), em que somente o SMG 03 mensurou valores de tensão abaixo de 5 kPa. Importante ressaltar que, tanto os DC quanto os SMG foram testados antes da instalação no solo e, todas as leituras realizadas mostraram coerência, isto é, quando saturados, os valores indicados pelo leitor Watermark[®] foram de zero (0 kPa). Essa observação foi constatada no experimento realizado com a cultura do milho e, possivelmente possa estar relacionado com processos de corrosão microbiologicamente induzida.

Analisando o Gráfico 7, constata-se uma diferença expressiva no número de vezes em que os valores de tensão de água no solo atingiu a linha de referência de 20 kPa quando utilizado os SMG. Conforme destacam Gacitúa et al. (2012), as propriedades elétricas do solo podem ser alteradas em decorrência

de processos microbiológicos, sobretudo, em solos com alta umidade, ocasionando discrepâncias nas medições.

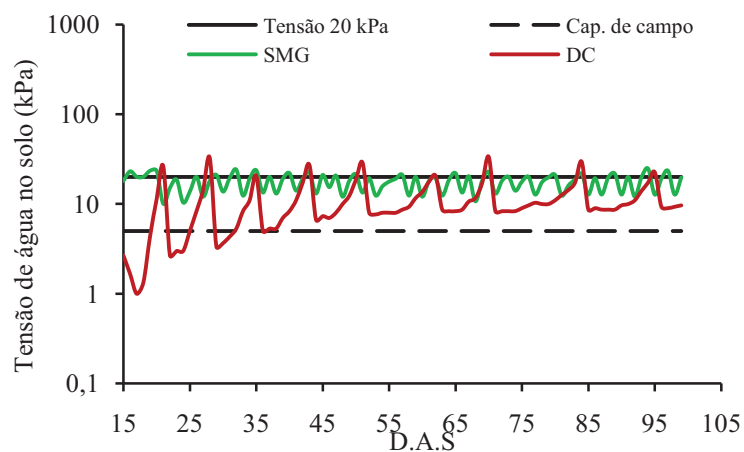


Gráfico 7 Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 20 kPa

Nos Gráficos 8 e 9, são mostrados os valores diários de tensão ao longo do ciclo da cultura do trigo para a tensão de 40 kPa. Verifica-se, no Gráfico 8, que o DC 02 apresentou maiores variações nas leituras. Porém, quando irrigou as parcelas experimentais, todos os DC registraram valores abaixo de 5 kPa.

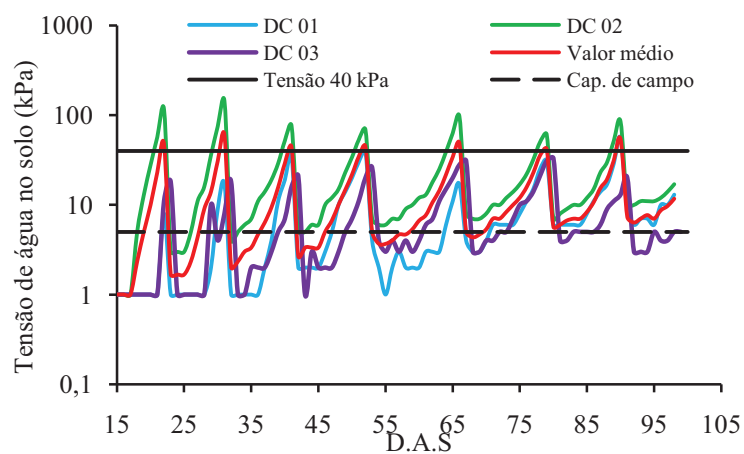


Gráfico 8 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 40 kPa

No Gráfico 9, observa-se uma menor variação dos valores de tensão de água no solo, em relação à média. Entretanto, conforme já mencionado, os valores mensurados não atingiram a tensão de 5 kPa (linha pontilhada).

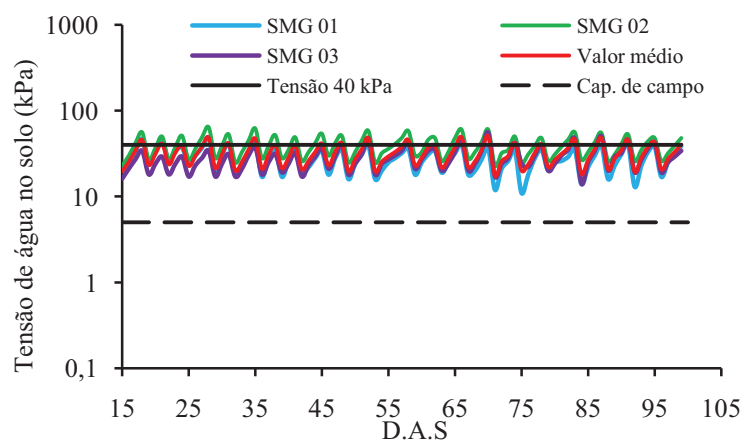


Gráfico 9 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 40 kPa

Quando comparado os dois dispositivos (Gráfico 10), nota-se novamente uma diferença considerável no número de irrigações.

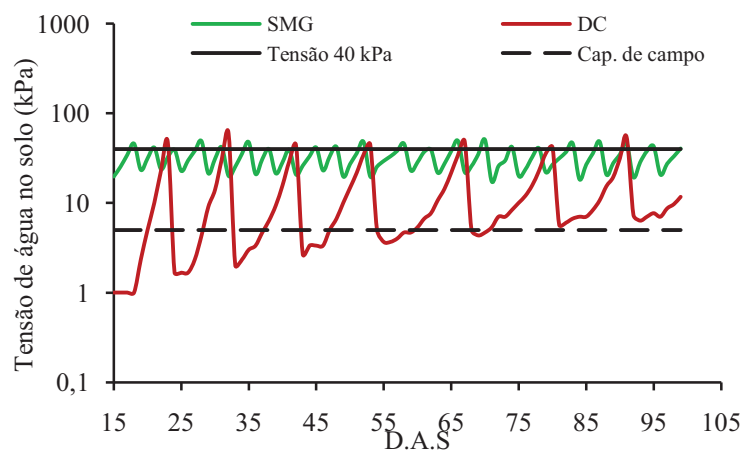


Gráfico 10 Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 40 kPa

Nos Gráficos 11 e 12, são mostrados os valores diários de tensão ao longo do ciclo da cultura do trigo para a tensão de 80 kPa.

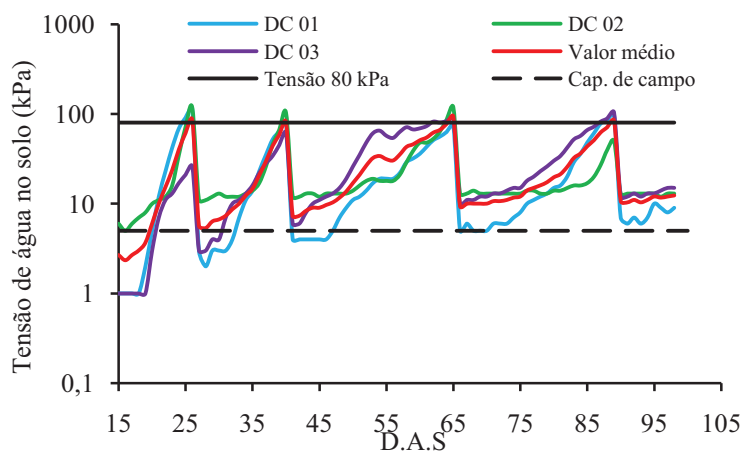


Gráfico 11 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 80 kPa

Nesse tratamento de 80 kPa, verifica-se que SMG 03 (Gráfico 12) apresentou comportamento bastante distinto dos demais SMG, isto é, a partir dos

58 DAS os valores de tensão de água no solo não diminuíram, mesmo após uma irrigação. Assim, optou-se realizar o manejo da irrigação considerando somente os valores médios obtidos pelas leituras do SMG 01 e SMG 02.

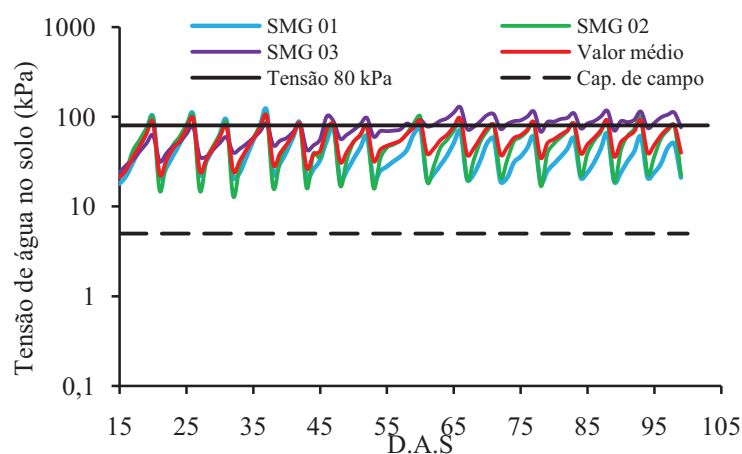


Gráfico 12 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 80 kPa

Quando comparado os dois dispositivos (Gráfico 13), verifica-se comportamento similar aos demais tratamentos, ou seja, o número de irrigações foi maior nas parcelas experimentais monitoradas por meio dos SMG.

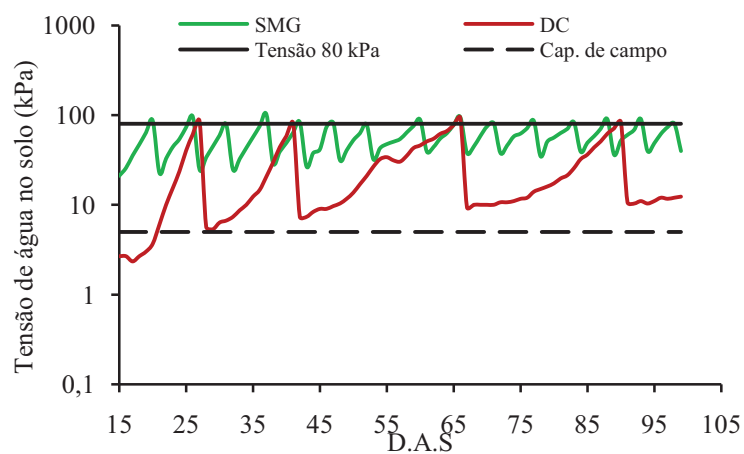


Gráfico 13 Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 80 kPa

Nos Gráficos 14 e 15, são mostrados os valores diários de tensão ao longo do ciclo da cultura para a tensão de 140 kPa, por meio dos DC e SMG, respectivamente.

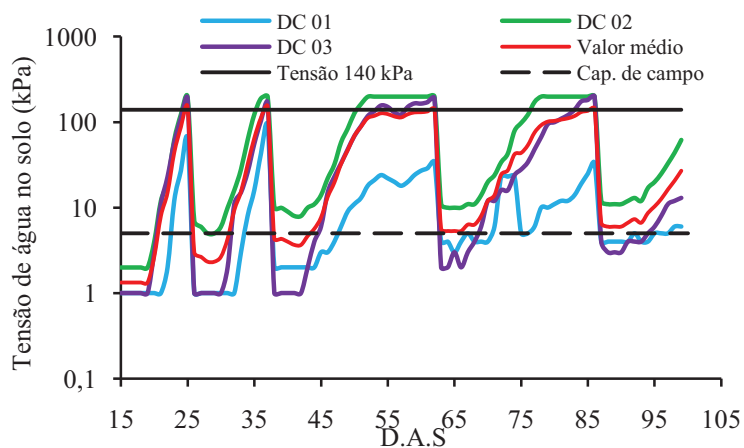


Gráfico 14 Comportamento da tensão de água no solo observado nos DC durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 140 kPa

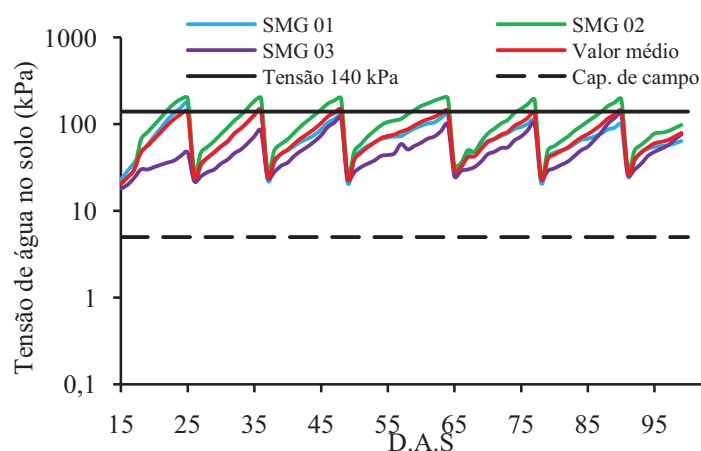


Gráfico 15 Comportamento da tensão de água no solo observado nos SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 140 kPa

Similarmente aos demais tratamentos, no Gráfico 14, são mostrados os valores diários da tensão de água no solo submetido ao valor de 140 kPa, utilizando os DC. Verifica-se que o DC 02 mensurou valores de tensão de 199 kPa entre os 53 e 62 DAS, isto é, alcançou o limite máximo de leitura do instrumento. Tal acontecimento se repetiu entre os 78 e 86 DAS. Outro fato ocorrido neste tratamento refere-se ao decréscimo de tensão de água no solo, medidos por meio do DC 01 a partir dos 51 DAS. A leitura, neste período, foi influenciada pela água de uma chuva com vento que atingiu a parcela experimental onde o sensor estava instalado. Para evitar complicações nas medições futuras, instalou-se um aparato com lona plástica em um dos lados da casa de vegetação.

De acordo com o Gráfico 15, houve diferença nas medidas do SMG 02 em relação aos demais. É importante frisar que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, essa variabilidade é inevitável, devido ao comportamento dinâmico da água no solo. Segundo Malazian et al. (2011), medidas exatas de tensão de água no solo são difíceis e os valores mensurados são mais uma indicação do estado da água do solo.

Ao comparar os dois dispositivos (Gráfico 16), nesse tratamento de 140 kPa, nota-se que, a diferença no número de irrigação foi menor. Nos tratamentos submetidos às tensões menores, sobretudo, o de 20 kPa, a diferença no volume de água aplicado foi mais acentuada. Vale lembrar que, neste tratamento de 140 kPa, o valor de tensão na capacidade de campo também não foi atingido ao utilizar o SMG.

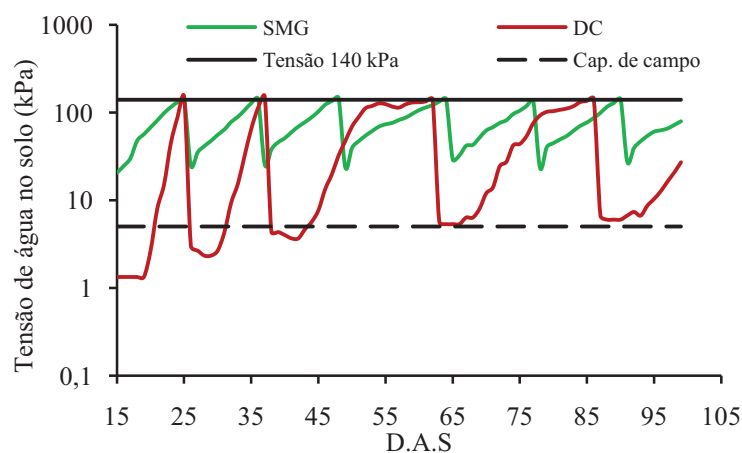


Gráfico 16 Comportamento das leituras médias observado nos DC e SMG durante o ciclo da cultura do trigo no tratamento de 140 kPa

Diante dos resultados observados neste experimento, recomenda-se analisar a viabilidade do uso destes sensores no manejo da irrigação, pois, ao longo do tempo, as leituras realizadas pelo mesmo sensor estão sujeitas a erros consideráveis na medição.

4.4 Número de irrigação e volume de água aplicado

Ao longo do ciclo da cultura do trigo, registrou-se o número de irrigações e o volume de água aplicado para as diferentes tensões de água no solo. No Gráfico 17, é mostrado o número de irrigações registradas nas diferentes tensões e dispositivos. Observa-se que, em todos os tratamentos, o número de irrigações foi maior quando realizou o manejo da irrigação por meio do SMG.

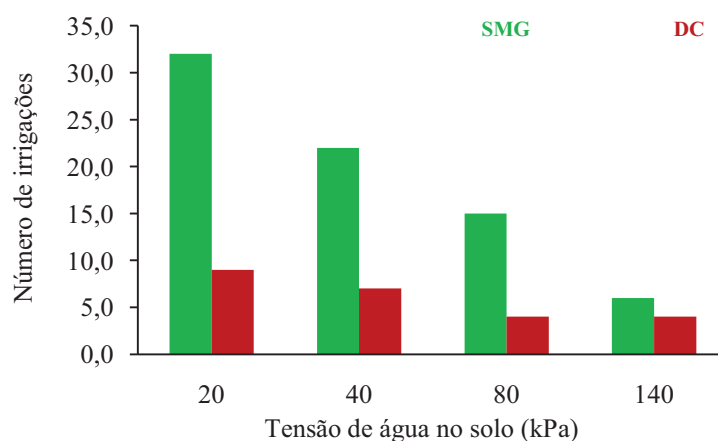


Gráfico 17 Número de irrigações registrado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo

No Gráfico 18, é mostrado o volume de água aplicado para os diferentes tratamentos. Nota-se que, o manejo da irrigação realizado mediante o uso dos SMG, resultou em um maior volume de água em relação ao outro dispositivo.

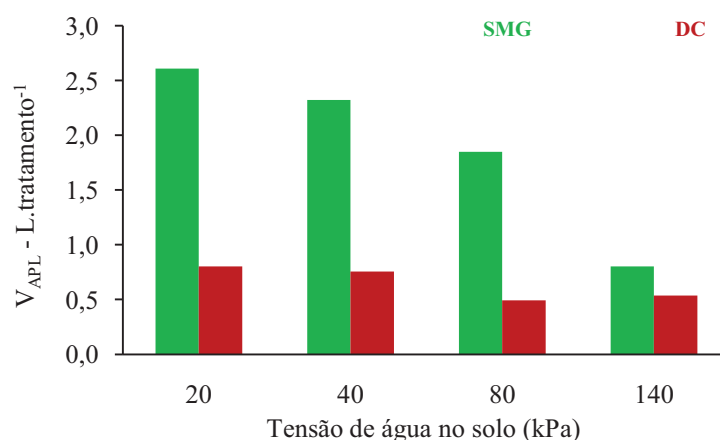


Gráfico 18 Volume de água aplicado durante a condução do experimento para cada tratamento de tensão de água no solo e dispositivo

Os valores apresentados na Tabela 4 evidenciam a diferença ocorrida entre os dispositivos no que diz respeito ao volume de água aplicado. Por exemplo, o tratamento submetido à tensão de 20 kPa e manejo realizado por meio das leituras dos DC, resultou em uma economia de 69,22% quando comparado com os SMG.

Tabela 4 Volume de água aplicado durante a condução do experimento para os diferentes tratamentos de tensão de água no solo e dispositivo

| Tensão (kPa) | Volume de água aplicado (L.tratamento ⁻¹) | | |
|--------------|---|--------|--------------|
| | DC | SMG | Economia (%) |
| 20 | 160,64 | 521,84 | 69,22 |
| 40 | 151,45 | 464,68 | 67,41 |
| 80 | 98,53 | 369,63 | 73,34 |
| 140 | 107,53 | 160,46 | 33,01 |

Nota-se ainda que o tratamento, submetido a tensão de 80 kPa e manejo realizado por meio das leituras dos DC, proporcionou maior economia. De acordo com Thompson et al. (2006) apud Silva (2013), mesmo quando as

calibrações são efetuadas para um solo específico, as equações ajustadas podem perder precisão em decorrência das condições de cultivo, e destacam que os efeitos da salinidade do solo sobre os sensores Watermark[®] necessitam ainda de ser descritos.

4.5 Resumo das avaliações

Na Tabela 5, é apresentado o resumo dos resultados das análises de variância para os seguintes parâmetros: produtividade de grãos (P_G), número de grãos por espiga (N_{GE}), massa seca da parte aérea (M_S) e eficiência de uso da água (EUA).

Tabela 5 Resumo da análise de variância: produtividade de grãos, número de grãos por espiga, massa seca da parte aérea e eficiência de uso da água em função dos tratamentos de tensão de água no solo e dos dispositivos utilizados no manejo da irrigação

| FV | GL | Quadrado Médio | | | |
|------------------|----|------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| | | P_G (kg.ha ⁻¹) | N_{GE} | M_S (g.planta) | EUA (g.L ⁻¹) |
| Blocos | 2 | 256384,405 ^{ns} | 4,461 ^{ns} | 0,018 ^{ns} | 0,0153 ^{ns} |
| Dispositivos (D) | 1 | 45332,256 ^{ns} | 19,207 ^{ns} | 0,008 ^{ns} | 4,1783 ^{ns} |
| Tensão (T) | 3 | 86730,151 ^{ns} | 16,676 ^{ns} | 0,027 ^{ns} | 0,4525* |
| Interação (DxT) | 3 | 395938,182 ^{ns} | 20,326 ^{ns} | 0,017 ^{ns} | 0,0793 ^{ns} |
| Resíduo | 14 | 236081,645 | 10,268 | 0,015 | 0,250 |
| Média Geral | - | 3526,31 | 27,25 | 1,12 | 0,95 |
| CV | - | 13,78 | 11,76 | 11,08 | 16,65 |

*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.

De acordo com os resultados observados na Tabela 5, não houve interação entre os dispositivos utilizados em nenhum dos parâmetros avaliados.

Dentre os parâmetros avaliados neste trabalho, a produtividade de grãos merece destaque, pois, sua utilização permite que os triticultores comparem e criem condições mais favoráveis na produção deste cereal. Diante dos resultados da Tabela 5, depreende-se que, independente das tensões de água no solo e do dispositivo utilizado, não houve diferença significativa na produtividade de grãos. Embora exista recomendação para irrigar o trigo na faixa de tensão de água no solo entre 80 e 150 kPa, pesquisas recentes têm demonstrado ganhos em produtividade em faixas menores de tensão. Silva, Arf e Rodrigues (2008), avaliando o efeito do manejo do solo e água nas características fenológicas e produtivas do trigo, na região de cerrado, concluíram que as cultivares de trigo IAC 2 e BRS 210 apresentaram maior rendimento de grãos quando submetidas a uma tensão de água no solo de 50 kPa. Experimento conduzido em um Latossolo Vermelho Escuro por Guerra, Silva e Azevedo (1994), na região do cerrado, demonstrou que a produção de grãos de trigo não foi afetada significativamente para tensões de água no solo entre 37 e 67 kPa, sendo a tensão de 60 kPa e profundidade de instalação dos tensiômetros de 10 cm indicadas como adequadas. Trindade et al. (2006), utilizando doses de nitrogênio e tensão de água no solo como fatores de produtividade de trigo no cerrado, concluíram que a tensão de 60 kPa foi mais adequada, pois, não afetou a produtividade nem a qualidade dos grãos de trigo. Em consonância com os resultados supracitados, Fronza et al. (2007) recomendam tensão de 60 kPa para irrigar lavouras com potencial produtivo em torno de 5.000 kg/ha e 40 kPa quando a expectativa de rendimento for superior a 6.000 kg/ha com tensiômetros instalados a 10 cm de profundidade.

Os resultados obtidos com o presente trabalho não indicaram diferenças significativas dentro das tensões estudadas, as quais atingiram até 140 kPa. Provavelmente, isso se deve ao fato de que os sensores, em função de efeitos de corrosão, apresentavam uma resistência “residual”, causando uma leitura de

tensão de água no solo maior que a real, e, com isso, mais irrigações e maiores volumes eram aplicados. Embora essa constatação tenha sido mais evidente nos tratamentos monitorados pelos SMG, as leituras médias de tensão de água utilizando os DC tiveram comportamento similar, ou seja, ao longo do ciclo da cultura, as leituras médias de tensão aumentavam progressivamente, e em alguns tratamentos não atingiram o valor da capacidade de campo.

No Gráfico 19, é mostrado o comportamento da eficiência de uso da água em função da tensão de água no solo. Verifica-se que, independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação, a EUA foi maior no tratamento submetido à tensão de 140 kPa.

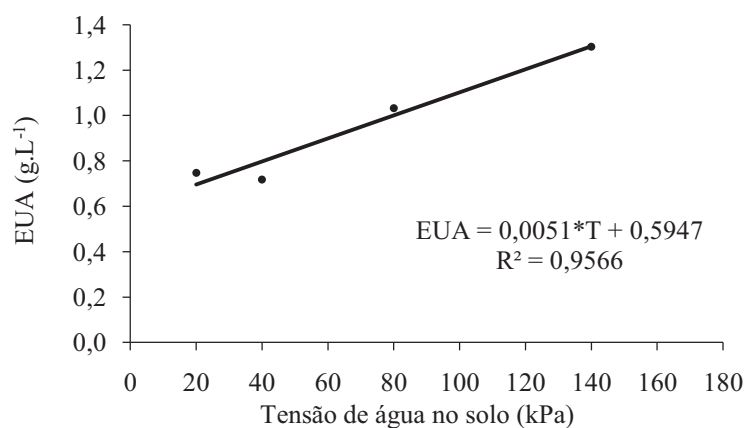


Gráfico 19 Eficiência do uso da água pela cultura do trigo em função dos tratamentos de tensão de água no solo

5 CONCLUSÕES

- a) O manejo da irrigação utilizando o dispositivo capacitivo, com o leitor Watermark[®], proporcionou menor número de irrigação e volume de água aplicado em relação aos tratamentos monitorados via sensores de matriz granular. Entretanto, observou-se que ao longo do tempo, os valores de tensão de água no solo, registrados por alguns DC aumentavam progressivamente não atingindo a capacidade de campo, possivelmente em decorrência do fenômeno de biocorrosão;
- b) Recomenda-se analisar a viabilidade do reuso de ambos os dispositivos no manejo da irrigação, pois, ao longo do tempo, na superfície metálica dos eletrodos, pode ocorrer formação de biofilme comprometendo a determinação da tensão de água no solo;
- c) Independente do dispositivo empregado no manejo da irrigação e da tensão de água no solo, a produtividade de grãos, número de grãos por espiga e massa seca da parte aérea não apresentaram, estatisticamente, diferença significativa.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos mínimos para elaboração de projeto de sistema de irrigação localizada**. ABNT, Projeto 12:02.08-022. São Paulo, 1986. 8 p.
- CAMARGO, C. E. O.; FERREIRA FILHO, A. W. P. Cultivo de trigo duro no Brasil. **O Agrônomo**, Campinas, v. 52, n. 1, p. 13-18, jan./abr. 2000.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p.1862-1866, nov./dez. 2007.
- 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.
- FRONZA, V. et al. (Ed.). Trigo. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **101 culturas**: manual de tecnologias agrícolas. Belo Horizonte, 2007. p. 751-762.
- FURLAN, F. **Efeito do déficit hídrico em duas variedades de trigo (*triticum aestivum L.*) em associação com bactérias promotoras do crescimento vegetal**. 2013. 78 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2013.
- GACITÚA, G. et al. Estimations of moisture content in the active layer in an Arctic ecosystem by using ground-penetrating radar profiling. **Journal of Applied Geophysics**. Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 100-106, Apr. 2012.
- GARCIA, J. D. **O trigo brasileiro e a falta de autossuficiência**: uma identificação de problemas. 2011. 50 p. Projeto de Pesquisa (Especialização MBA em Gestão do Agronegócio) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

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.

GUERRA, A. F.; SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. Tensão de água no solo: um critério viável para irrigação do trigo na região do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 4, p. 631-636, 1994.

HANSON, R. B.; ORLOFF, S.; PETERS, D. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. **California Agriculture**, Califórnia, v. 54, n. 3, p. 38-42, May/June 2000.

LAILHACAR, B.C.; DUKES, M. D. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. **Journal of Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 666-672, May 2010.

LÓPEZ, R. A. B. et al. Calibración del sensor de matriz granular (SMG) para determinar la retención de agua en el suelo para la programación de riego em tomate en el Valle del Yaqui. **Revista Latino Americana de Recursos Naturales**, Obregón, México, v. 9, n.1, p. 11-16, feb. 2013.

MALAZIAN, A. et al. Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 402, n. 1-2, p. 126-134, May 2011

MORESCO, E. R. et al. Estratégias de melhoramento para o trigo tropical. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 34, n. 274, p. 40-48, maio/jun. 2013.

OLIVEIRA, L. A. **Condições de aplicação de água em cinco cultivares de trigo em ambiente protegido**. 2009. 68 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

OSÓRIO, E.A. **A cultura do trigo**. São Paulo: Globo, 1992. p. 218.

SILVA, D. B. et al. **Trigo para o abastecimento familiar: do plantio à mesa**. Brasília: Embrapa, 1996. 176 p.

SILVA, D. O. M. **Validação de um sensor de determinação da umidade do solo para o manejo da irrigação**. 2013. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2013.

- SILVA, M. R. R.; ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F. Cultivares de trigo sob manejos de solo e água, na região de cerrado. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 921-927, jul. 2008.
- SHOCK, C. C.; FEIBERT, E. B. G.; SAUNDERS, L. D. Onion yield and quality affected by soil water potential as irrigation threshold. **Hort Science**, Alexandria, v. 33, n. 7, p. 1188-1191, Dec. 1998a.
- SHOCK, C. C.; FEIBERT, E. B. G.; SAUNDERS, L. D. Potato yield and quality response to deficit irrigation. **Hort Science**, Alexandria, v. 33, n. 4, p. 655-659, July 1998b.
- SOARES SOBRINHO, J. et al. **Identificação de genótipos de trigo irrigado em dois locais de Minas Gerais, no ano de 2010**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. 12 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).
- SOUZA, M. A.; PIMENTEL, A. J. B. Estratégias de seleção para melhoramento do trigo com tolerância ao estresse por calor. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 34, n. 274, p. 30-39, maio/jun. 2013.
- TERZIS, A. et al. Wireless sensor networks for soil science. **International Journal of Sensor Networks**, London, v. 7, n.1, p. 53-70, Mar. 2010.
- THOMPSON, R. B. et al. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. **Journal Irrigation Science**, New York, v. 23, n. 3, p. 185-202, Mar. 2006.
- THOMPSON, R. B. et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 88, n. 1-3, p. 147-158, Mar. 2007.
- TRINDADE, M. G. et al. Nitrogênio e água como fatores de produtividade do trigo no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 24-29, Jan. 2006.
- VELLIDIS, G. et al. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Journal of Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 61, n.1, p. 44-50, Apr. 2008.

CONCLUSÃO GERAL

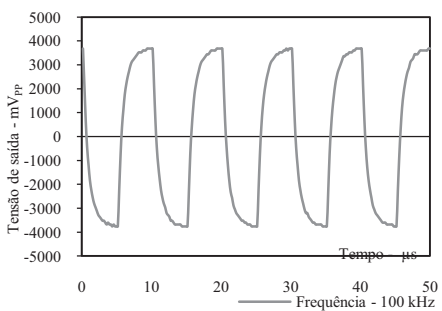
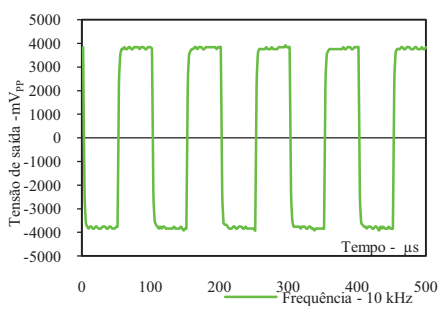
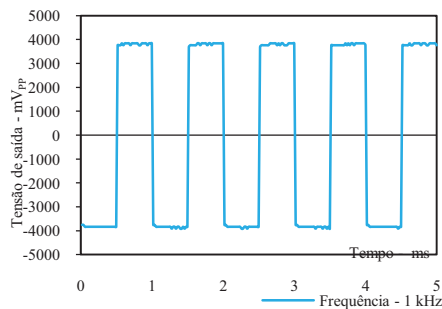
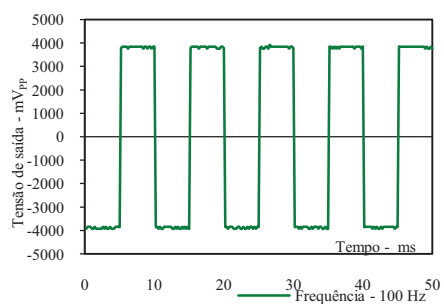
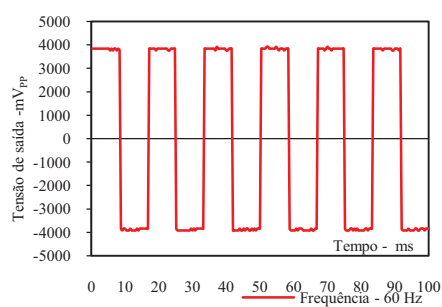
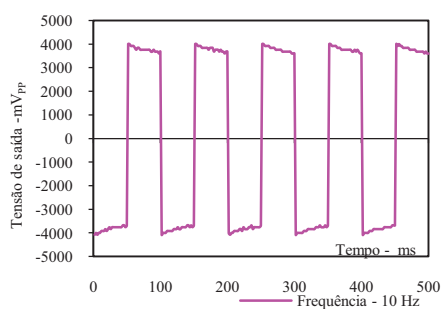
No Brasil, a área irrigada em 2012, foi estimada em 5,8 milhões de hectares. Alguns especialistas do setor afirmam que o país irriga muito pouco em vista dos 30 milhões de hectares com potencial de serem irrigados. Entretanto, é consenso que sistemas de irrigação são acionados, na maioria das vezes, sem nenhum critério técnico agrônomo causando, entre outros problemas, desperdício de água. Sabe-se que as práticas de manejo de irrigação, em grande parte, dependem da determinação da umidade do solo considerando variações temporais e espaciais na zona radicular, sobretudo, em regiões semi-áridas e áridas. Existem estudos mostrando que o investimento em novas tecnologias de manejo da irrigação pode reduzir o gasto de água entre 10% e 50%. Assim, para potencializar a eficiência do uso da água pelos sistemas de irrigação, buscou-se por meio deste trabalho, desenvolver um dispositivo capacitivo (DC) capaz de estimar umidade do solo a um custo mais acessível. Verificou-se boa correlação entre umidade gravimétrica do solo com a tensão elétrica de saída do circuito RC, no qual os DC estavam conectados. Observou-se comportamento distinto dos sinais elétricos de saída, ao calibrar os DC com diferentes classes de solo, comprovando assim, a necessidade de calibração dos sensores para cada tipo de solo. Por meio do circuito RC, estimou-se a capacitância elétrica que demonstrou forte dependência da quantidade de água entre os eletrodos do DC, bem como do efeito da frequência do campo elétrico aplicado. As equações ajustadas para estimar as leituras de tensão de água no solo, por meio do DC, permitiram conduzir três diferentes experimentos em casa de vegetação. Ao comparar com os tensiômetros, o DC demonstrou comportamento similar em relação ao volume de água aplicado e produção da alface romana. Quando comparado com os sensores de matriz granular (SMG), conclui-se que os DC foram mais eficientes, pois, o volume de água aplicado foi

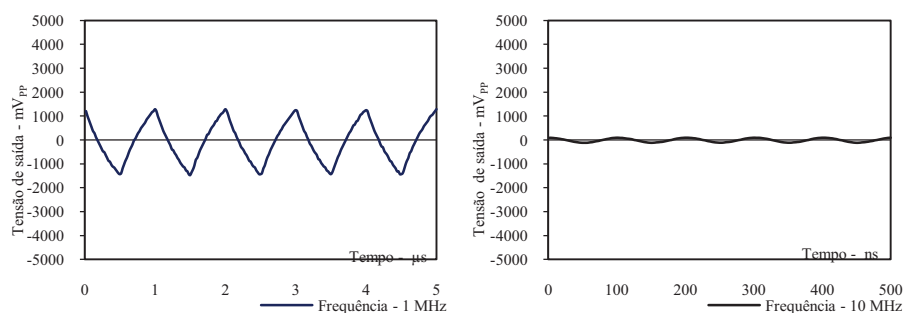
menor e não houve diferença significativa tanto na produção de grãos de milho quanto na de trigo. Todavia, ao analisar a superfície dos eletrodos de cobre, utilizado na fabricação do DC, constatou-se que as leituras poderiam estar sendo afetadas por processos de corrosão microbiologicamente induzida em decorrência da formação de biofilme. Diante dos resultados, recomenda-se analisar a viabilidade do reuso dos sensores eletrométricos no manejo da irrigação, pois, ao longo do tempo, as leituras de tensão de água no solo, efetuadas pelo mesmo sensor, poderão incidir em erros consideráveis.

APÊNDICES

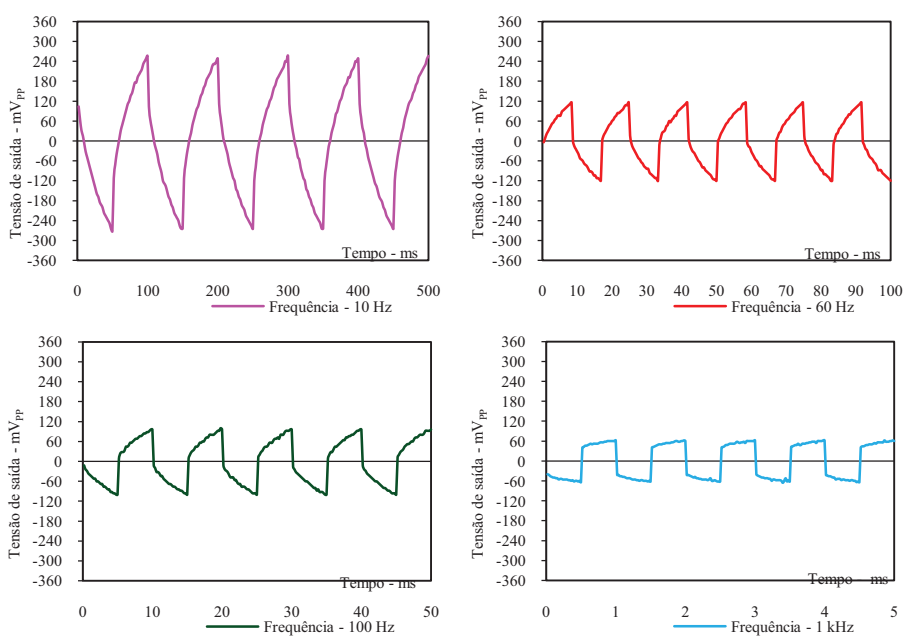
APÊNDICE A - Formas de onda quadrada

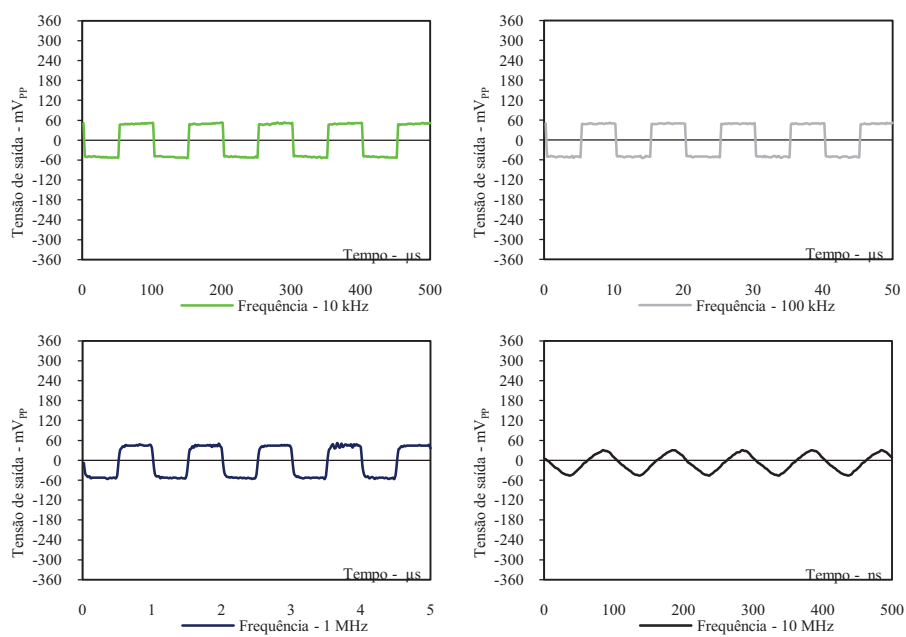
- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 24,64 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVd.



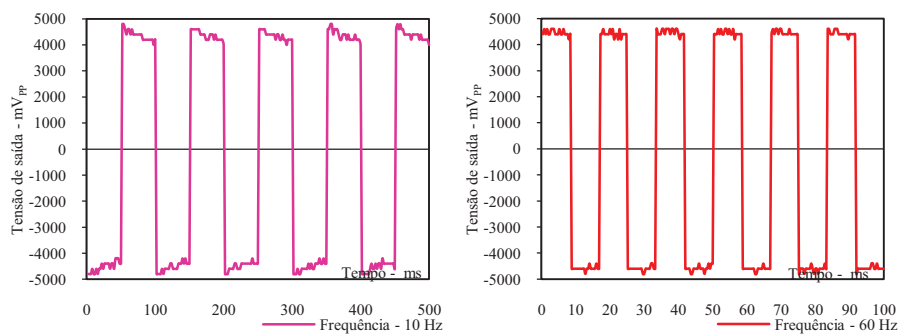


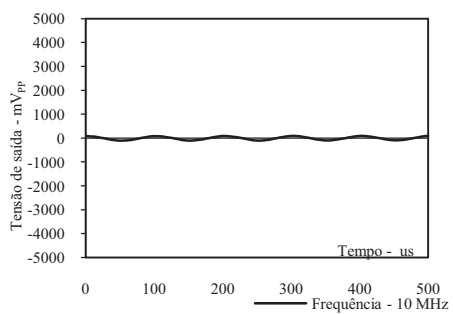
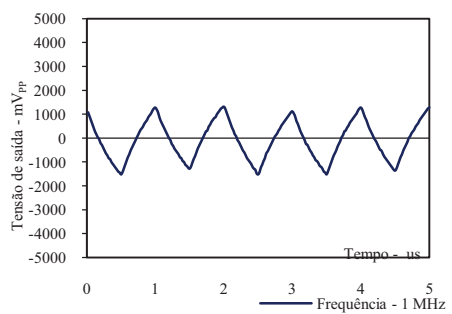
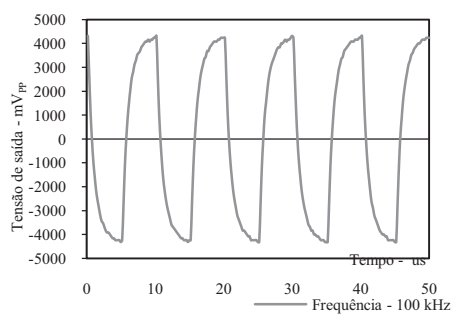
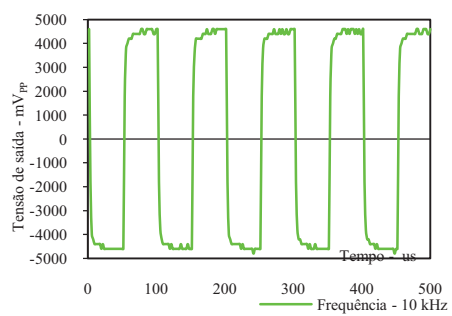
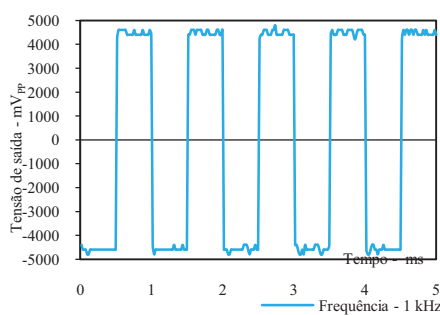
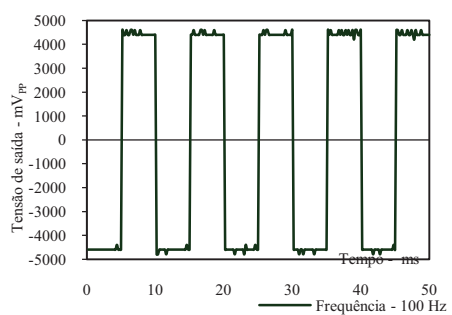
- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 41,31 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVd.



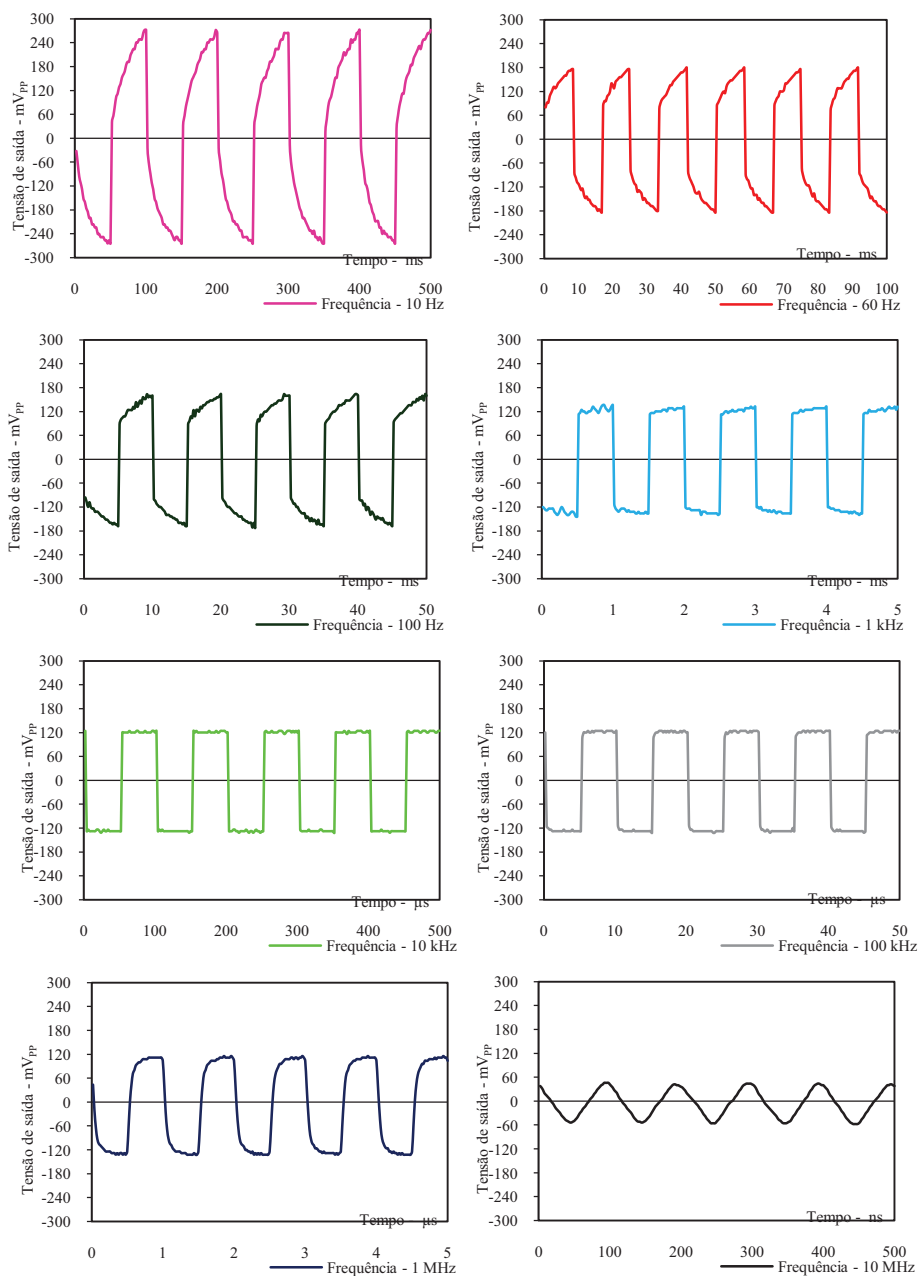


- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 6,86 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVA.



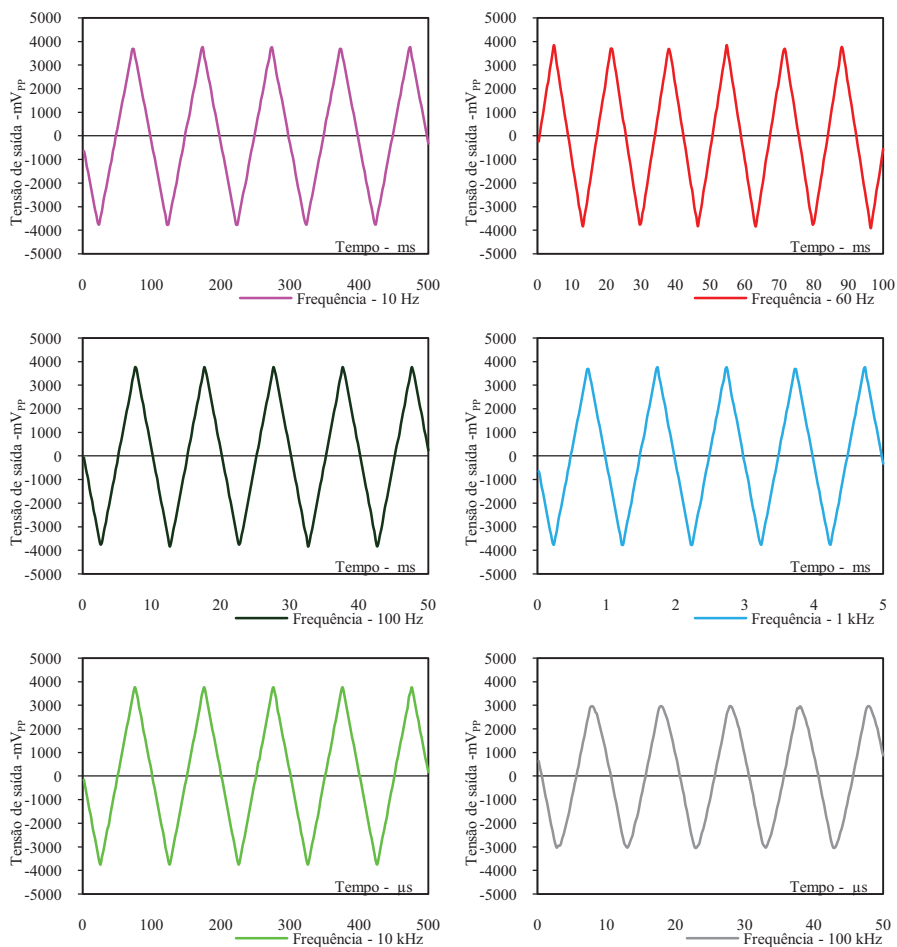


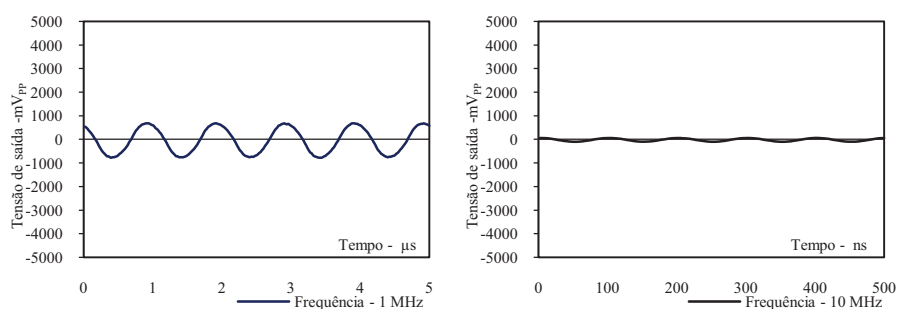
- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 28,53 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVA.



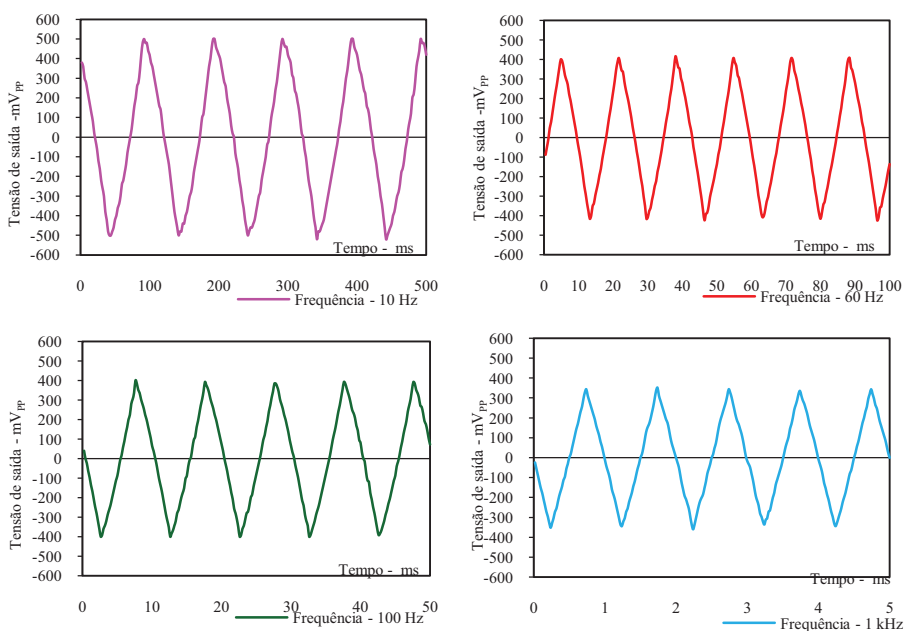
APÊNDICE B - Formas de onda triangular

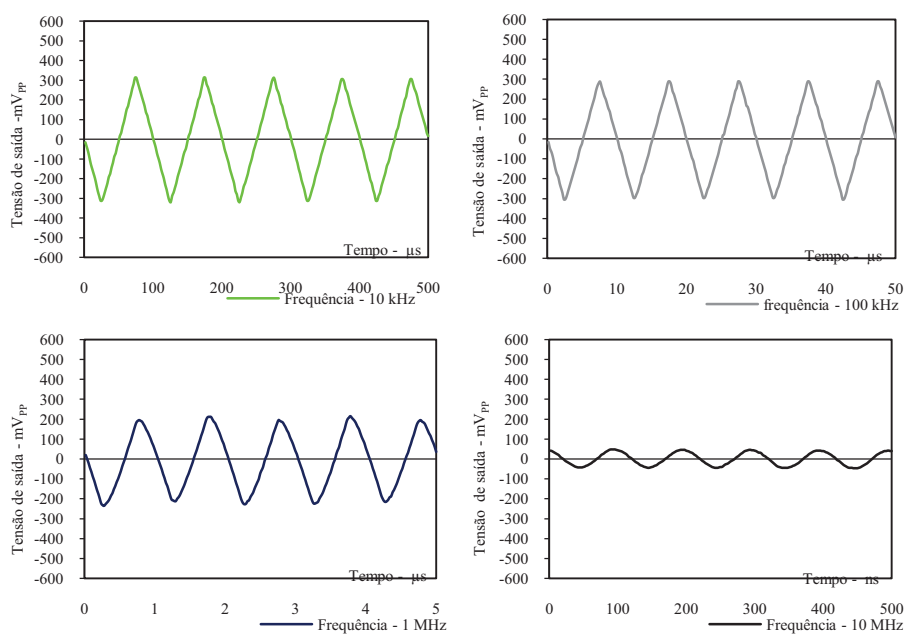
- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 24,64 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVd.



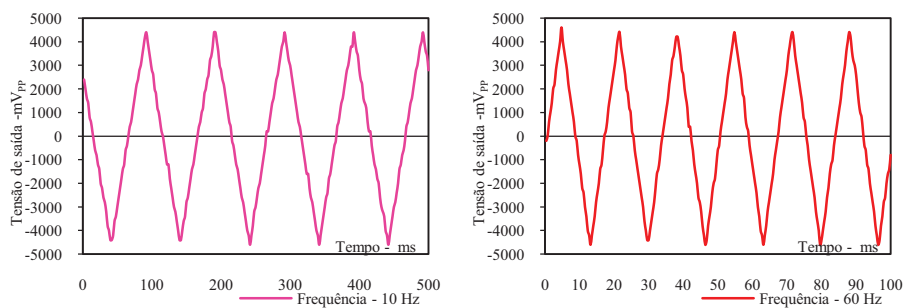


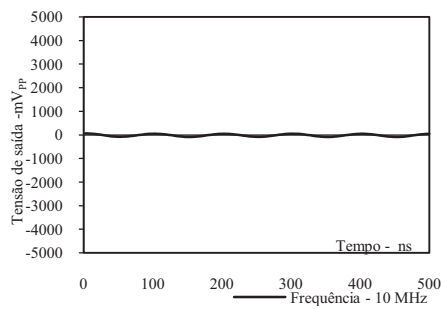
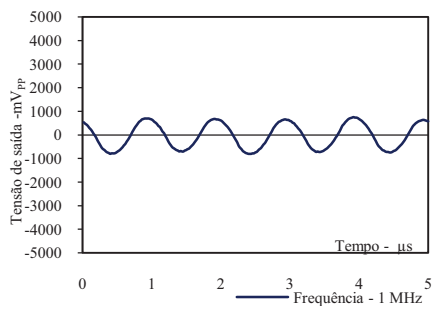
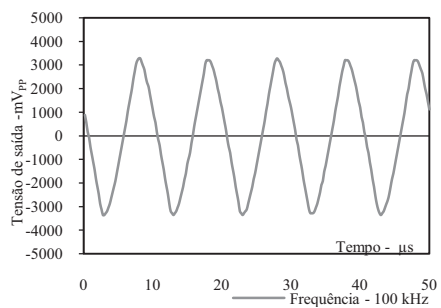
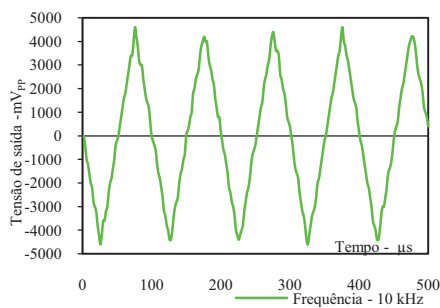
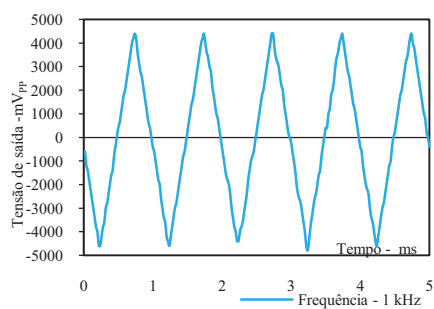
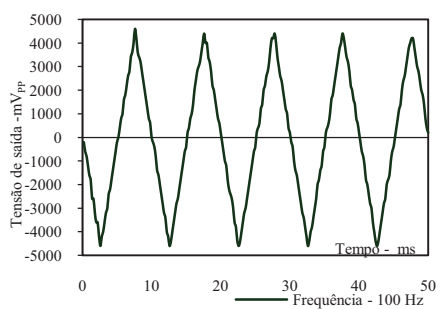
- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 41,31 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVd.





- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 6,86 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVA.





- Tensão elétrica de saída dos DC em amostras de solo com 28,53 % de umidade gravimétrica submetida a diferentes frequências - LVA.

