



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PEDRO IDELANO DE ALENCAR FELÍCIO**

**MÉTODO DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA DE BAIXA PRESSÃO COM SISTEMA  
DE CÁPSULAS POROSAS COMO EMISSOR**

**FORTALEZA**

**2019**

PEDRO IDELANO DE ALENCAR FELÍCIO

MÉTODO DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA DE BAIXA PRESSÃO COM SISTEMA DE  
CÁPSULAS POROSAS COMO EMISSOR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Renato Silva da Frota Ribeiro.

Coorientador: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F349m Felicio, Pedro Idelano de Alencar.  
Método de Irrigação Localizada de Alta Pressão com Sistema de Cápsulas Porosas como Emissor /  
Pedro Idelano de Alencar Felicio. – 2019.  
65 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Renato Silvio da Frota Ribeiro .  
Coorientação: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva .
1. Transudação. 2. Condutância. 3. Pressão de borbulhamento. 4. Agricultura familiar. I. Título.  
CDD 630
-

PEDRO IDELANO DE ALENCAR FELÍCIO

MÉTODO DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA DE BAIXA PRESSÃO COM SISTEMA DE  
CÁPSULAS POROSAS COMO EMISSOR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Renato Silvio da Frota Ribeiro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Moisés Custódio Saraiva Leão  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Christina Bianchi  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP– Portugal)

Em memória de minha Mãe, Senhora Izaura de Alencar Felício, pessoa que quando em vida, nunca deixou de me estimular nas mais diferentes fases da minha trajetória, minha eterna gratidão.

“Mãe, a promessa que lhe fiz, hoje foi literalmente cumprida”

.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a DEUS pela minha existência.

Agradeço aos meus Pais Raimundo e Izaura, por ter me dado a vida.

Agradeço aos meus familiares, esposa, filhos, netos, genros e nora, por terem torcido pelo sucesso de mais uma escalada.

Agradeço de forma especial ao Professor Doutor Renato Silvio da Frota Ribeiro, pela maneira gentil com que coordenou meus trabalhos por ocasião do Doutorado.

Agradeço ao meu amigo irmão, Professor Doutor Alexsandro Oliveira da Silva, pela orientação objetiva no desenvolvimento do meu trabalho.

Agradeço em especial condição ao meu colega Engenheiro Agrônomo Ms. Severo Pacífico Lima, pela liberação de materiais e equipamentos usados no presente trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor Raimundo Nonato Távora da Costa, pelos sucessivos conselhos na formatação da minha tese.

Agradeço ao Professor Doutor José Carlos de Araújo, pela maneira fraterna que me aconselhou por ocasião do Doutorado.

Agradeço ao Professor Doutor Jaedson Claudio Anunciato Mota, pelas diversas consultas a mim concedida quando da edição da minha tese.

Agradeço ao Professor Doutor Gil Aquino Farias, velho amigo, por ter me encorajado a fazer o Doutorado.

Agradeço aos professores abaixo listados, pela deferência que fui tratado por ocasião dos desenvolvimentos dos meus trabalhos:

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra

Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho

## RESUMO

O presente trabalho se propõe a contribuir no estudo de técnicas para reduzir o uso da água na agricultura, através de um método de irrigação localizada, com sistema de cápsulas porosas como emissor, sem que haja risco de interferir na fisiologia da planta e nem reduzir sua produção de frutos. O trabalho consta de quatro capítulos, por entender que esta forma seja mais apropriada e de fundamental importância no desenvolvimento das ideias. O primeiro capítulo versa, com o uso da literatura, sobre o uso da irrigação no estado do Ceará e a utilização de cápsulas porosas na agricultura, organizando ideias e teorias fundamentadas nos aspectos relacionados à irrigação localizada e o fluxo de água no solo. O segundo capítulo trata-se especificamente sobre a avaliação das cápsulas porosas para uso como emissor, para tanto, foram utilizadas dez cápsulas porosas para demonstrar sua heterogeneidade, quanto a diversos aspectos, dentre estes, pode-se destacar o teste de pressão de borbulhamento, condutância hidráulica e transudação. Para melhor entender a microestrutura física das cápsulas, lançou-se mão da nanotecnologia, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura, com resolução de 1nm, tendo um aumento do tamanho das figuras das cápsulas em até 50.000 vezes. Quanto aos resultados, a pressão de borbulhamento média encontrada foi de 2,34 atm, enquanto a condutância apresentou valores de  $9,27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Pode-se observar, através do uso do microscópio, que as fissuras nas cápsulas são totalmente distintas, comprovando a sua heterogeneidade. A recomendação do uso de cápsulas porosas como emissores para irrigação localizada é a de que e as mesmas apresentem baixos valores de condutância hidráulica ( $1,50 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e alta pressão de borbulhamento (2,5 atm), constituindo em critério determinante para que o sistema funcione com adequada uniformidade. O terceiro capítulo, versa sobre a formação do bulbo molhado produto da ação do fluxo de água que transpassa as paredes da cápsula, observando as pressões de alimentação aplicadas o volume de água consumido na formação do bulbo, na unidade de tempo, as pressões em kPa encontradas no interior do bulbo, dentre outras observações não menos importante, explicitadas no desenvolvimento do capítulo. No quarto capítulo trata-se da elaboração de um sistema de irrigação via cápsulas porosas para irrigação na cultura do rabanete, para o sistema de irrigação proposto, utilizaram-se dez cápsulas porosas na execução do ensaio experimental que consistiu em um delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos, constando de diferentes manejos de irrigação (manejo via clima, via solo e via cápsula porosa) com 10 repetições, totalizando 30 unidades experimentais. Foram

avaliados os seguintes parâmetros de produção: matéria fresca e seca da parte aérea, raiz, diâmetro da raiz e comprimento das plantas. Para a cultura em estudo, não foram observadas diferenças entre os tratamentos estudados, onde a massa fresca da raiz apresentou valores de 7,4 g planta<sup>-1</sup> para o manejo via clima e 4,7 g planta<sup>-1</sup> para o manejo via cápsula porosa, não sendo estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Sendo assim, conclui-se que o uso de sistemas de irrigação por cápsulas porosas, apresenta-se como uma alternativa para o cultivo de hortaliças em pequenas áreas, devido a sua baixa pressão e fácil manuseio.

**Palavras-chave:** Transudação. Condutância. Pressão de borbulhamento. Agricultura familiar.



## ABSTRACT

The present work proposes to contribute to the study of techniques to reduce the use of water in agriculture through a localized irrigation system with porous capsule as emitter, no risk of interfering with the physiology of the plant or reducing its fruit production. The work consists of three chapters, as it is understood that this form is more appropriate and of fundamental importance in the development of ideas. The first chapter deals with the use of literature on the use of irrigation in the state of Ceará and the use of porous capsules in agriculture, organizing ideas and theories based on aspects related to localized irrigation and the flow of water in the soil. The second chapter deals specifically with the evaluation of the porous capsules for use as emitter. For this purpose, ten porous capsules were used to demonstrate their heterogeneity. In several aspects, among these, it is possible to emphasize the bubbling pressure test, hydraulic conductance and transudation. To better understand the physical microstructure of the capsules, nanotechnology was used, using the Scanning Electron Microscope, with a resolution of 1 nm, increasing the size of the fissures of the capsules by up to 50,000 times. As for the results, the average bubbling pressure was 2.34 atm, while the conductance presented values of  $9.27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . It can be observed, through the use of the microscope, that the cracks in the capsules are totally different, proving their heterogeneity. The recommendation of the use of porous capsules as emitters for localized irrigation is that they have low values of hydraulic conductance ( $1.50 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) and high bubbling pressure (2.5 atm), constituting a determining criterion for the system to function with adequate uniformity. The third chapter deals with the formation of the wet bulb resulting from the action of the water flow that goes through the capsule walls, observing the feed pressures applied the volume of water consumed in the bulb formation, in the unit of time, the pressures in kPa found inside the bulb, among other not less important observations, made explicit in the development of the chapter. The fourth chapter deals with the elaboration of an irrigation system via porous capsules for irrigation in the radish crop, for the proposed irrigation system, ten porous capsules were used in the execution of the experimental test, which consisted of a completely randomized design with three treatments, consisting of different irrigation managements (management via climate, via soil and via porous capsule) with 10 replications, totaling 30 experimental units. The following production parameters were evaluated: fresh and dry matter of shoot, root and length of plants. For the study culture, no differences were observed between the treatments studied, where the fresh root mass presented values of  $7.4 \text{ g plant}^{-1}$  for the management via climate and  $4.7 \text{ g plant}^{-1}$  for the management via porous

capsule, and were not statistically different by the Tukey test ( $p < 0.05$ ). Therefore, it is concluded that the use of irrigation systems by porous capsules is an alternative for the cultivation of vegetables in small areas due to their low pressure and easy handling.

**Keywords:** Transudation. Conductance. Bubbling pressure. Family farming.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Experimento realizado por Darcy (1859) .....	20
Figura 2	– Equipamento para medidas de vazão sobre carga decrescente .....	21
Figura 3	– Fixador de amostras (A) e visão geral do metalizador de amostras utilizado(B) .....	27
Figura 4	– Equipamento usado para fazer o teste de pressão de borbulhamento (A) e Fixador de capsula (B) .....	28
Figura 5	– Equipamento para medidas de transudação de cápsulas sob carga decrescente .....	29
Figura 6	– Análise microscópica das cápsulas porosas com aumento de 500 vezes (A); 1500 vezes (B); 3500 vezes (C) e 50.000 vezes (D) .....	30
Figura 7	– Foto Colorimétrica da concentração dos elementos e compostos químicos nas cápsulas porosas .....	32
Figura 8	– Valores de pressão de borbulhamento e condutância hidráulica observadas nas cápsulas estudadas .....	33
Figura 9	– Fotografia ampliada em 1000 vezes de cápsulas porosas em condições normais e expostas a pressão de borbulhamento .....	34
Figura 10	– Relação vazão x pressão contínua nas cápsulas porosas utilizadas para o sistema de irrigação .....	35
Figura 11	– Relação vazão x pressão decrescente nas cápsulas porosas utilizadas para o sistema de irrigação .....	36
Figura 12	– Disposição dos sensores e capsula no recipiente contendo amostra de solo .....	42
Figura 13	– Fotografia do sistema de mensuração do bulbo .....	42
Figura 14	– Fotografia da visualização do bulbo .....	45
Figura 15	– Estação Agrometeorológica da UFC .....	49
Figura 16	– Curva característica do solo utilizado .....	52
Figura 17	– Sistema de irrigação por cápsulas porosas .....	53

Figura 18 – Detalhe do sistema de emissão de água utilizado .....	53
Figura 19 – Teste de Tukey( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa fresca da parte aérea .....	56
Figura 20 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa fresca da parte aérea .....	57
Figura 21 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa seca da parte aérea ...	58
Figura 22 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável diâmetro da raiz aérea .....	59
Figura 23 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa fresca da parte aérea .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de produção agrícola no Estado do Ceará .....	15
Tabela 2 – Concentração de elementos observados nas cápsulas porosas .....	31
Tabela 3 – Atributos físico do solo utilizado no experimento .....	44
Tabela 4 – Atributos químico do solo utilizado no experimento .....	50
Tabela 5 – Atributos químicos do composto para adubação de cobertura .....	50
Tabela 6 – Tabela de dados da evolução do bulbo .....	50
Tabela 7 – Análise de variância para os parâmetros de produção e crescimento da cultura do rabanete .....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	14
1.1	Importância da agricultura irrigada no Estado do Ceará .....	14
1.2	Irrigação Localizada .....	15
1.3	Uso de cápsulas porosas na agricultura .....	17
1.4	Pressão de borbulhamento e condutância hidráulica em cápsulas porosas .....	18
<b>2</b>	<b>AVALIAÇÃO DE CÁPSULAS POROSAS PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA</b> .....	24
2.1	Introdução .....	25
2.2	Materiais e métodos .....	26
2.2.1	<i>Estrutura investigada através de nano-microscopia</i> .....	27
2.2.2	<i>Pressão de borbulhamento, condutância hidráulica e transudação das cápsulas</i> .....	27
2.2.3	<i>Análise estatística dos resultados</i> .....	29
2.3	Resultados e Discussão .....	29
2.3.1	<i>Estrutura investigada através de nano-microscopia</i> .....	29
2.3.2	<i>Análise dos parâmetros obtidos na cápsula</i> .....	32
2.3.3	<i>Transudação</i> .....	34
2.4	Conclusões .....	37
<b>3</b>	<b>FORMAÇÃO DO BULBO MOLHADO A PARTIR DA CAPSULA POROSA</b> .....	38
3.1	Introdução .....	39
3.2	Material e Métodos .....	41
3.3	Resultados e Discussões .....	44
3.3.1	<i>Evolução do bulbo</i> .....	46
3.3.2	<i>Calculo do volume do bulbo</i> .....	44
3.4	Conclusão .....	45
<b>4</b>	<b>PRODUÇÃO DE RABANETE COM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR CÁPSULAS POROSAS</b> .....	47
4.1	Introdução .....	48
4.2	Materiais e Métodos .....	49

4.2.1	<i>Área experimental</i> .....	49
4.2.2	<i>Escolha da cultura e tratos culturais</i> .....	49
4.2.3	<i>Delineamento experimental e tratamentos</i> .....	51
4.2.4	<i>Variáveis analisadas</i> .....	54
4.2.5	<i>Análise estatística dos resultados</i> .....	54
4.3	<b>Resultados e Discussão</b> .....	54
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	61
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62

## **1 INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1 Importância da agricultura irrigada no Estado do Ceará**

A Irrigação é uma aplicação artificial da água sobre a terra, que deve ser feita em ocasião oportuna e em quantidade adequada a cada cultura, objetivando suprir as necessidades fisiológicas das plantas e compensar suas perdas de água ocorridas pelo processo de evapotranspiração (MAIA et al., 2010; REICHARDT e TIMM, 2004; TESTEZLAF, 2017). A adequação do manejo da irrigação tem como objetivos primordiais a agilização da infiltração, e a minimização das perdas por percolação profundas, garantindo as condições ideais para o conforto hídrico dos vegetais.

O uso da irrigação tem sido observado desde a pré-história, visto que o homem vem desviando cursos d'água para irrigar suas plantações, sendo o uso desta técnica que possibilitou o estabelecimento humano em zonas áridas e semiáridas, tornando esses locais permanentemente habitados (TESTEZLAF, 2017). A agricultura brasileira historicamente é uma das principais bases da economia do país, desde a colonização até os dias atuais, vindo esta nos últimos anos crescendo de tal modo que hoje o país é um dos maiores fornecedores de alimentos do mundo (MELO JÚNIOR et al., 2013; GRAH, 2011).

A produção agrícola do estado do Ceará sempre esteve à mercê de um planejamento de políticas agrícolas e agrárias adequadas a sua realidade, com uma região ocupada em sua maioria por um clima semiárido, some-se ainda a este fato, o problema das estiagens periódicas cuja probabilidade de acerto das precipitações quanto à intensidade é difícil, estiagens estas que nos tempos presente (2012 a 2019), já se prolonga por sete anos. A segurança hídrica prometida pelos sucessivos governos se arrasta há anos, o sonho da vinda das águas do rio São Francisco, que deverá contar com 477 Km de extensão, aduzidos em dois eixos, Leste e Norte, pretende garantir água para 12 milhões de pessoas em 390 municípios nos estados de Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, sendo uma possibilidade de assegurar uma melhora no abastecimento público (LIMA, 2005; VIANA, 2011).

Mesmo diante da escassez de água dos últimos anos, a agricultura no estado do Ceará, tem dado respostas ano após ano, que é capaz de se transformar num seguimento produtivo significativo na participação do PIB do nosso estado. Contudo, a falta de informações confiáveis sobre dados estatísticos sólidos, referente à utilização da água na agricultura, que nos permita ter uma visão realista, nos impede de oferecer por vezes



contribuições na direção da tentativa de colaborar para solucionar os problemas observados já há muito tempo, sobre o uso racional da água no Nordeste.

Nas propriedades com menos de 50 hectares, portanto dos pequenos produtores, que são responsáveis por um pouco mais da metade (53,9%) do total produzido do estado (ADECE, 2018), estão condicionados fatores que influenciam diretamente o volume da produção, poderíamos citar como o mais importante a utilização racional da água através do sistema de irrigação apropriado (TESTEZLAF, 2017). Como regra geral os pequenos agricultores da região do semiárido, produzem culturas de subsistência e em menor escala, culturas rentáveis (Tabela 1). Dentre as culturas rentáveis se destaca o cultivo da fruticultura e horticultura conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de produção agrícola no Estado do Ceará

<b>Valor bruto da produção agrícola (R\$)</b>			
	2016	2017	Aumento
Frutas	1,096 bilhão	1,530 bilhão	40,40%
Cereais, Legumes e oleaginosas	589,9 milhoes	867,5 milhões	47,00%
Tubérculos raízes e outros	344,1 bilhões	411,6 milhões	19,60%
<b>Total</b>	<b>2,030 bilhões</b>	<b>2,809 bilhões</b>	<b>38,00%</b>

Fonte: <https://www.ceara.gov.br/2018/01/23/valor-bruto-da-producao-agricola-no-ceara-cresce-38-em-2017/>

Segundo informações da ADECE (2018), em publicação recente, as mudanças climáticas estão para vir, havendo um aumento na demanda de água para irrigação, contrariando as estimativas de evapotranspiração que deverá aumentar na ordem de 2,2 a 3,1%, as precipitações pluviais diminuirão na ordem de 30,9 a 37,3 %. O que ressalta ainda mais a importância do uso racional da água.

## 1.2 Irrigação Localizada

A irrigação localizada caracteriza-se, basicamente, pela aplicação da água numa fração do volume do solo explorado pelas raízes, através de gotejadores, tubo poroso ou microaspersores, geralmente com distribuição da vazão pressurizada em curtos intervalos de rega (SOUZA et al., 2012). O sistema consiste em aplicar a água diretamente na região radicular em pequenas intensidades e alta frequência mantendo esse solo próximo à capacidade de campo (MELO JÚNIOR et al., 2013).

Esses sistemas utilizam pequenas vazões, quando comparados a outros sistemas de irrigação, devido o emprego de emissores com diâmetros de saída reduzidos submetidos a baixas pressões, fixos na tubulação dispostas na superfície do solo ou enterradas, acompanhando as linhas de plantio. (FRIZZONE et al., 2012; TESTEZLAF, 2017; MELO JÚNIOR et al., 2013).

O emissor é um dos principais componentes em um sistema de irrigação, responsável pela liberação da água em quantidades pré-determinadas pelo projetista, para atender as necessidades da cultura (BURT e STYLES, 1994; SOUZA et al., 2012). A disposição dos emissores diretamente na superfície do solo permite que o processo de infiltração ocorra dentro de um pequeno volume de solo, conhecido como bulbo molhado (MAIA et al., 2010).

O bulbo úmido se forma a partir de uma fonte pontual de água no solo que se propaga tridimensionalmente através da frente de molhamento (ELAIUY et al., 2015). Informações da geometria do bulbo molhado são importantes para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume de solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de aplicação de água (MAIA et al., 2010).

As dimensões do bulbo úmido dependem, sobretudo, dos seguintes fatores: estrutura e textura do solo, vazão do gotejador, frequência de aplicação e umidade inicial do solo (ELAIUY et al., 2012). Conforme MAIA et al. (2010), as informações de profundidade e de largura do bulbo molhado no solo são importantes para que seja possível efetuar o correto manejo da irrigação, auxiliando na quantidade de água a ser aplicada na planta, desta maneira tendo um adequado planejamento de irrigação, verificando a necessidade hídrica das plantas e principalmente a umidade do solo em diferentes profundidades. Se faz necessário que a água do solo seja monitorada constantemente com o objetivo de observar a eficácia do manejo de irrigação, bem como acompanhar a umidade do solo no local da zona radicular.

De acordo com Melo Júnior et al. (2013), a irrigação localizada é considerada o setor mais promissor da irrigação, apresentando atualmente a maior taxa de crescimento nos países desenvolvidos, ocorrendo com base na conversão de sistemas por superfície e de aspersão comum, tendo como objeto o aperfeiçoamento do uso dos recursos hídricos disponíveis, por exigência de políticas de gerenciamento ou por interesses econômicos dos proprietários de terras.

Nos últimos anos os sistemas de irrigação localizada, tem apresentado significativo crescimento, ocupando dentro das áreas irrigadas um maior espaço, mostrando-se como atividade promissora para o desenvolvimento da fruticultura irrigada no Brasil, além

de culturas como cana-de-açúcar e café (SOUZA, 2012).

Este sistemas se desenvolveram em função da escassez de água, pois como aplica água em apenas parte da área, reduz a superfície do solo que fica molhada, exposta às perdas por evaporação, fazendo com que dessa maneira se tenha uma eficiência de aplicação bem maior se comparado a outros sistemas e menor consumo de água (MELO JÚNIOR et al., 2013).

### **1.3 Uso de cápsulas porosas na agricultura**

As cápsulas porosas, também conhecidas como cápsulas cerâmicas, são instrumentos muito usados em dispositivos de mensuração, para obtenção de indicativos no estudo da dinâmica da água no solo sendo largamente conhecidas por serem utilizadas em tensiômetros, instrumento de mensuração da pressão em que se encontra a solução do solo, tendo características específicas que as classificam segundo modo de utilização.

As características de cada cápsula devem ser obrigatoriamente observadas antes do seu uso. A tensão de borbulhamento e a condutância, definem a otimização de resultados (LIBARDI, 2012). Livingston em (1918) e Richards, (1949), já vislumbravam o uso de material poroso para este fim, quando sugeriu a aplicação de água no solo através de tubos porosos, para controlar o nível da água no solo com fins de manter o conforto hídrico para as plantas. Richards e Blood (1939) aperfeiçoaram os estudos de Livingston em condições de campo, quando utilizou auto-irrigadores de argila de 7cm de diâmetro e 60cm de comprimento.

Vários ensaios foram feitos com “potes” de barro enterrados no nível do sistema radicular da cultura desejada, como fonte de alimentação hídrica. (MONDAL, 1974). A literatura hoje posta à disposição para consulta e orientação sobre o assunto, se limita a descrição do uso da capsula, como parte de um instrumento medidor de tensão, enquanto nossa iniciativa é usar capsulas de mesma natureza na irrigação localizada como parte do emissor.

São inúmeras as formas de usos das cápsulas porosas, destacaremos na oportunidade as quatro mais conhecidas e usadas no meio acadêmico.

- I. Cápsula porosa usada como peça de transmissão nos tensiômetros. A utilização da cápsula porosa nos tensiômetros se opera através de um fluxo de água que transpassa as paredes da cápsula, no sentido de dentro para fora, forçado por uma diferença de pressão entre a coluna de água a que está submetida e a pressão negativa (sucção)

exercida pelas forças de coesão instaladas no solo que a circunda. Os esforços de pressão processados poderão ser registrados em manômetros.

- II. Cápsula porosa usada como peça de extrator de solução de solo. Nesta atividade a cápsula porosa se presta para retirar a solução aquosa no interior do solo, o fluxo que vai transpassar suas paredes no sentido de fora para dentro, quando submetida a um esforço de pressão negativa ou exposta a um sistema de vácuo. Os esforços processados devem ser controlados e registrados, há necessidade de verificar os limites de resistência mecânica da cápsula.
- III. Cápsula porosa usada como emissor na irrigação localizada. A utilização nesta atividade se processa quando um fluxo de água transpassa as paredes das cápsulas de dentro para fora, forçado pela carga de uma coluna d'água a que está submetida. A pressão que a cápsula será submetida tem que ser previamente mensurada para atender a vazão de operação desejada.
- IV. Cápsula porosa como sensor de umidade. À medida que a umidade é captada pelas paredes da cápsula, em função de um fluxo que se desloca de fora para dentro, um sensor no interior da capsula faz medidas e as compara a uma resistência elétrica de referência, traduzindo o teor de umidade do solo e sua respectiva pressão, normalmente em kPa.

Trabalhos como os de Silva et al. (2000) e Silva et al. (2016), mostram a viabilidade do uso das cápsulas porosas como extratores de solução do solo e sua precisão na determinação de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{K}^+$ . Brito et al. (2009) em estudos sobre o desempenho diferentes tipos de tensiômetros para leitura do potencial mátrico, apontam o tensiômetro de bourdon para tais leituras como útil para medidas de tensão e de maneira indireta para determinação da umidade do solo. Trabalho propostos por Silva et al. (1981) abordam o uso de cápsulas porosas como emissores, segundo ainda estes autores, a proposta deste sistema é justamente o uso em pequenas áreas, onde a necessidade de pressão seja mínima, tal fato pode ser uma vantagem em pequenas hortas e até jardins.

#### **1.4 Pressão de borbulhamento e condutância hidráulica em cápsulas porosas**

Dentre os principais parâmetros de avaliação para o uso de cápsulas porosas, destacam-se a pressão de borbulhamento e a condutância hidráulica. Trabalhos como os de Moraes et al. (2005) e Soccol et al. (2005), observam que a necessidade de mensuração destes

parâmetros para uso das cápsulas porosas para fins de uso em tensiômetros, contudo, poucos trabalhos sobre avaliação das capsulas porosas como emissores para irrigação são observados na literatura.

A pressão de Borbulhamento (P) é definida como a pressão mínima necessária que permite a passagem de uma fase gasosa através das paredes da capsula porosa quando umedecida de forma saturada. O cálculo com uso de fórmula específica (SOCCOL et al., 2005), se propõe encontrar o valor do raio hidráulico do maior poro contínuo do material utilizado na cápsula.

$$P = 2. \sigma r^{-1} \quad (1)$$

Em que:

P - Pressão de borbulhamento (Pa);

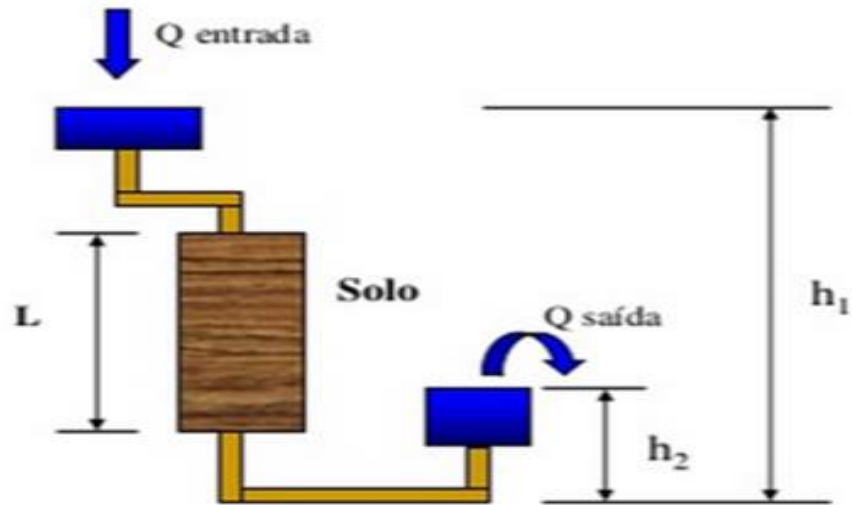
$\sigma$  - Tensão superficial da água ( $\text{N m}^{-1}$ );

r - Raio do maior poro contínuo da capsula (m).

A necessidade do cálculo da pressão de borbulhamento ao qual as cápsulas deverão se submeter, está intrinsecamente ligado à precisão das medidas que devem ser feitas por ocasião do uso da capsulas, para tanto, a pressão de borbulhamento é realizada através do método direto, que consiste em submeter a capsulas a pressões pneumáticas crescente quando as mesmas estão imersas em água destilada, dentro de um recipiente translucido para que se possa visualizar a passagem dos gases através das paredes da cápsula (LIBARDI, 2012). Através da pressão de borbulamento pode-se testar a resistência mecânica da peça, desobstruir os microporos, dar continuidade as micros galerias, bem como verificar se elas não apresentam rachaduras que comprometam as medidas nelas operadas.

Para determinação da condutância hidráulica, primeiramente é necessário conhecer a teoria clássica para os fenômenos de permeabilidade, considerando fluxos laminares homogêneos. Esta teoria foi expressa a partir dos experimentos de Henry Darcy em 1856 (SCHEIDEGGER, 1974) hoje conhecida como lei de Darcy (REICHARDT e TIMM, 2004). A lei de Darcy pode ser entendida como um caso particular da equação de conservação de momento linear de um fluido newtoniano incompressível que escoar em um meio poroso rígido (Figura 1) completamente saturado por este fluido.

Figura 1 – Experimento realizado por Darcy (1859).



Fonte: UFC – Departamento de Engenharia Agrícola

Segundo as observações de Darcy em 1856, tem-se que:

A vazão ( $Q$ ) que passa pelo material poroso é proporcional a área ( $A$ ) deste material poroso:

$$Q \sim A \quad (2)$$

A vazão ( $Q$ ) que passa pelo material poroso é proporcional à variação da carga do fluído, no caso a água ( $\Delta h$ ):

$$Q \sim \Delta h \quad (3)$$

A vazão ( $Q$ ) que passa pelo material poroso é inversamente proporcional ao comprimento da amostra ( $L$ ):

$$Q \sim \frac{1}{L} \quad (4)$$

Portanto, quando uma grandeza é simultaneamente proporcional a várias outras, é também proporcional ao produto delas, portanto:

$$Q \sim A \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

Adicionando-se um coeficiente de proporcionalidade a equação (4), denominada condutividade hidráulica ( $K$ ) tem-se, a fórmula de Darcy:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (6)$$

Em que:

Q – Vazão ( $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$ );

K – Condutividade hidráulica do material poroso ( $\text{cm h}^{-1}$ );

A – Área do material poroso ( $\text{cm}^2$ );

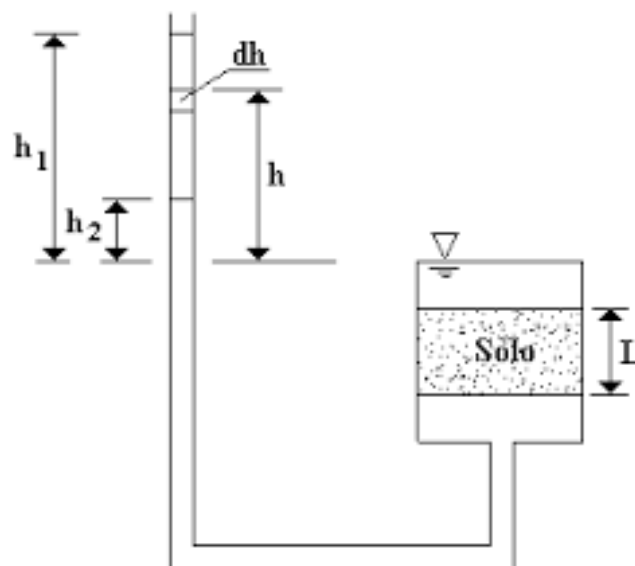
$\Delta h$  – Variação da pressão (cm);

L – Largura do material poroso (cm).

Tal lei (equação 6) é fundamental para determinação e compreensão dos movimentos do fluido ocasionados pela interação cápsula-solo, no processo de irrigação em função da pressão decrescente.

A condutância hidráulica das capsulas (C) é definida como a relação do volume transudado através das paredes da cápsula em um intervalo de tempo (vazão) e a diferença de pressão a ela submetida, entre o início e o fim do evento. Em verdade a condutância mensura a maior ou menor condição de impedimento que tem um fluxo de água para passar através das paredes da cápsula (LIBARDI, 2012), analogamente, ao experimento realizado por Darcy, para determinação da condutividade hidráulica, pode-se submeter a cápsula porosa a condições de pressões decrescentes, determinando sua vazão, conforme Figura 2. Estas observações permitem calcular a variável C, com boa precisão.

**Figura 2** – Equipamento para medidas de vazão sobre carga decrescente.



Fonte: UFC – Departamento de Engenharia Agrícola.

Sabendo-se que, o volume de água ( $dV_A$ ) é igual ao produto da secção transversal do tubo de saída da água ( $a$ ) pela variação da altura do líquido ( $dH$ ), tem-se:

$$\frac{dV_A}{dt} = \frac{a \cdot dH}{dt} \quad (7)$$

Portanto, como a vazão ( $Q$ ) pode ser representada por  $dv/dt$ , tem-se unindo as equações (6) e (7), e considerando  $\Delta h$  como  $H$ , temos que:

$$\frac{dV_A}{dt} = -K \cdot A \cdot \frac{H}{L} \quad \text{ou} \quad \frac{a \cdot dH}{dt} = -K \cdot A \cdot \frac{H}{L} \quad (8)$$

Rearranjando a fórmula, tem-se que:

$$\frac{dH}{H} = -\frac{K \cdot A}{a \cdot L} \cdot dt \quad \text{ou} \quad -\frac{dH}{H} = \frac{K \cdot A}{a \cdot L} \cdot dt \quad (9)$$

Com a integração da equação (9), tem-se que:

$$-\int_{H1}^{H2} \frac{dH}{H} = \int_{t1}^{t2} \frac{C \cdot A}{a \cdot L} \cdot dt = -\ln(H2) + \ln(H1) = \frac{C \cdot A}{a \cdot L} (t_2 - t_1) \quad (10)$$

Sabendo-se que a condutância pode ser definida como o produto entre área ( $A$ ) e a condutividade hidráulica ( $K$ ) pelo comprimento:

$$C = \frac{K \cdot A}{L} \quad (11)$$

Temos, igualando as equações (10) e (11), a fórmula final para uso:

$$C = \frac{a}{\Delta t} \ln\left(\frac{H1}{H2}\right) \quad (12)$$

Em que:

C- Condutância hidráulica ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )

$a$ - área da seção reta transversal do tubo condutor ( $\text{cm}^2$ );

$H_1$  e  $H_2$  - Carga hidráulica exercida na capsula porosa no intervalo de tempo que o evento considerado perdure (cm);

$\Delta t$  - Intervalo de tempo em que o nível da água no interior do tubo leva para se deslocar de  $H_1$  para  $H_2$  (segundos).

Observadas as características de P e C das cápsulas porosas, pode-se de fato ter a função de uso das mesmas, pois devido a rusticidade com que estas são fabricadas, a



heterogeneidade é um grande problema, pois as fissuras e poros não apresentam semelhanças de cápsula para cápsula. Portanto, cápsulas com valores de P elevados e C baixa são indicadas para uso como emissores de irrigação (SILVA et al., 1981), cápsulas com baixa P e elevado C podem ser utilizadas como tensiômetros com maior aplicabilidade (SOCCOL et al., 2005).

## 2 AVALIAÇÃO DE CÁPSULAS POROSAS PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

### Resumo

Há diversos usos para as cápsulas porosas na agricultura, contudo estas devem ser caracterizadas por parâmetros de avaliação. O objetivo deste estudo, foi aferir as características físicas de cápsulas porosas para uso na irrigação localizada. Para tanto, testes em dez cápsulas porosas foram realizadas. As cápsulas foram submetidas a testes de pressão de borbulhamento, condutância hidráulica e transudação (q) em pressão constante e variável. Os dados foram submetidos a estatística descritiva, determinando a média e o desvio padrão dos valores obtidos. Os dados de transudação foram submetidos a análise de regressão, para ajuste de modelos da relação de q em função da pressão exercida na cápsula. Para melhor entender a microestrutura física das cápsulas, lançou-se mão da nanotecnologia, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura, com resolução de 1nm, tendo um aumento visual da microestrutura das cápsulas em até 50.000 vezes. Quanto aos resultados, a pressão de borbulhamento média encontrada foi de 2,34 atm, enquanto a condutância apresentou valores de  $9,27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . A figura microscópica aumentada 50.000 vezes, apresentou a disposição “lamelar” das camadas que compõem as paredes das cápsulas evidenciando as aberturas com precisão. A recomendação do uso de cápsulas porosas como emissores para irrigação localizada é a de que, as mesmas apresentem baixos valores de condutância hidráulica ( $1,50 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e alta pressão de borbulhamento (2,5 atm), constituindo em critério determinante para que o sistema funcione com adequada uniformidade.

**Palavras-chave:** Condutância hidráulica; Transudação; Porosidade.

### Abstract

There are several uses for porous capsules in agriculture, however these should be characterized by evaluation parameters. The purpose of this study was to assess the physical characteristics of porous capsules for use in localized irrigation. For that, tests in ten porous capsules were performed. The capsules were submitted to pressure tests of bubbling, hydraulic conductance and transudation in constant and variable pressure. Data were submitted to descriptive statistics, determining the mean and standard deviation of the values obtained. Data were submitted to descriptive statistics, determining the mean and standard

deviation of the values obtained. The transudation data were submitted to regression analysis, to fit models of the relation of  $q$  as a function of the pressure exerted on the capsule. To better understand the physical microstructure of the capsules, nanotechnology was used, using the Scanning Electron Microscope, with a resolution of 1nm, increasing the size of the fissures of the capsules by up to 50,000 times. The mean bubbling pressure was 2.34 atm, while the conductance showed values of  $9.27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . The microscopic figure increased 50,000 times, presented the "lamellar" arrangement of the layers that make up the walls of the capsules evidencing the apertures with precision. The recommendation of the use of porous capsules as emitters for localized irrigation is that they have low values of hydraulic conductance ( $1.50 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) and high bubbling pressure (2.5 atm), constituting a determining criterion for the system to function with adequate uniformity.

**Keywords:** Hydraulic conductance; Transudation; Porosity.

## 2.1 Introdução

Há diversos usos para as cápsulas porosas, destacando-se tensiômetros como sensor de umidade (REICHARDT e TIMM, 2004), emissor de irrigação localizada para produção de hortaliças e flores (SILVA et al., 1981) e extrator de solução de solo para acompanhamento da fertirrigação (SILVA et al., 2000). Contudo, é necessário o conhecimento de algumas das características físicas de cada uma delas (SOCCOL et al., 2005), tais como a transudação, condutância e a pressão de borbulhamento, tendo em vista que estas características definem a forma mais adequada de uso das cápsulas (LIBARDI, 2012).

Cada cápsula porosa, ou cápsula cerâmica, embora seja fabricada em série, guarda características distintas das demais. Isto se deve primordialmente às formas geométricas das partículas que a constituem e o fato de que as acomodações entre as partículas não se repetem em cada cápsula. Em consequência dos arranjos das partículas, do material e da forma que cada cápsula é fabricada, originam-se poros, fissuras, microgalerias e a rugosidade das paredes internas (SOCCOL et al., 2005 e MORAES et al., 2006), o que ocasiona uma diferenciação entre cápsulas. Tal fato, apesar de não ser admitido, pode ocasionar erros em diversas tomadas de decisões na agricultura, como cálculo da lâmina de irrigação (cápsula em tensiômetro para medir a umidade) ou concentração de um elemento na solução do solo (extrator de solução), dependendo de como a cápsula será utilizada.

O emissor é um dos principais componentes em um sistema de irrigação localizada, responsável pela liberação da água em quantidades pré-determinadas pelo projetista, para atender as necessidades da cultura (TESTEZLAF, 2017). A disposição dos emissores diretamente na superfície do solo permite que o processo de infiltração ocorra dentro de um pequeno volume de solo, conhecido como bulbo molhado (MAIA et al., 2010). No sistema de cápsulas porosas como emissor, a formação do bulbo esta intrinsicamente ligada a passagem de água pelas fissuras das cápsulas, sendo vital sua determinação antes do uso deste tipo de emissor (SOCCOL et al., 2005), tal fato pode auxiliar no tipo de cápsula a ser utilizada.

Além da questão da heterogeneidade no aspecto físico, as cápsulas apresentam também compostos químicos variáveis de acordo com o fabricante, pois a origem do material para sua construção pode variar, de região para região, em diversos aspectos como a concentração de cálcio por exemplo, tal fato já foi questionado por Johnson e Cartwright (1980), onde segundo estes autores, as cápsulas de cerâmica podem contribuir para o aumento de certo íons na solução do solo, o que de certa forma pode comprometer dados de monitoramento, como a condutividade elétrica da solução do solo, quando as cápsulas de cerâmica são utilizadas como extrator de solução do solo.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é aferir as características físicas de cápsulas porosas fabricadas sem qualquer especificação pelo fabricante, além da obtenção dos compostos químicos para fins de caracterização. Entende-se como necessário o conhecimento de algumas das características físicas de cada uma delas, tais como a transudação sob diferentes níveis de pressão, condutância e a pressão de borbulhamento, tendo em vista que estas características definem a forma mais adequada de aplicação e uso das cápsulas.

## **2.2 Material e Métodos**

Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, nos meses de setembro e outubro de 2016. Os equipamentos utilizados nestes ensaios foram desenvolvidos e adaptados no DENA e aferidos no Laboratório de Metrologia Mecânica – Pressão – Força – Dimensional – Torque ASTEF (UFC) registrado sob o N° 26983 (manômetro da câmara de pressão, fixador de cápsulas, difusor).

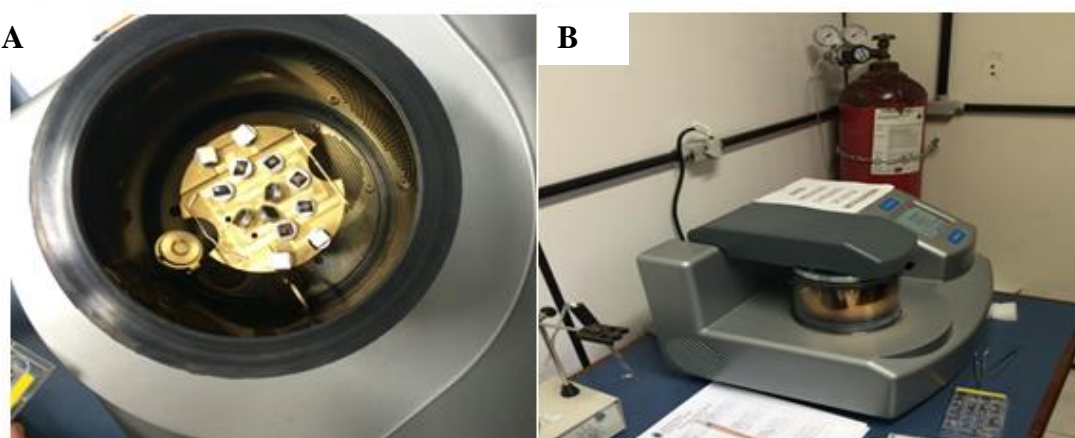
### ***2.2.1 Estrutura investigada através de nano-microscopia***

Para melhor entender a microestrutura física das cápsulas, lançou-se mão da nano tecnologia. Para tanto, amostras de dez cápsulas foram levadas para análise na Central Analítica do Departamento de Física da UFC. Foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 450 FEG (Figura 3A e 3B), com resolução de 1nm que permite magnificação de até 2MX.

Análises químicas elementares foram realizadas por EDS com resolução de 131 e V e detector Apollo X, que permitiram verificar além da concentração de elementos como: carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, silício, potássio, titânio, ferro e bromo além da microestrutura física da cápsula. As análises foram realizadas com temperatura controlada de ambiente a + 1.000 °C. Imagens foram obtidas com aumento do tamanho em 500, 1500, 3500 e 50.000 vezes sobre pressão controlada entre 10 a 400 Pa (modo ambiental).

As amostras foram levadas à análise do microscópio após, metalização das mesmas. A metalização foi procedida através de aparelho QUORUM modelo Q 150 T ES. Após as fixações, as amostras foram pulverizadas com ouro, por ser este metal ideal para propagação do fluxo magnético necessário para a ampliação das imagens. A análise microscópica também permitiu identificar e quantificar os elementos químicos que compõem a cápsula, através de imagens espectrográficas e colorimétricas.

Figura 3 – Fixador de amostras (A) e metalizador de amostras (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

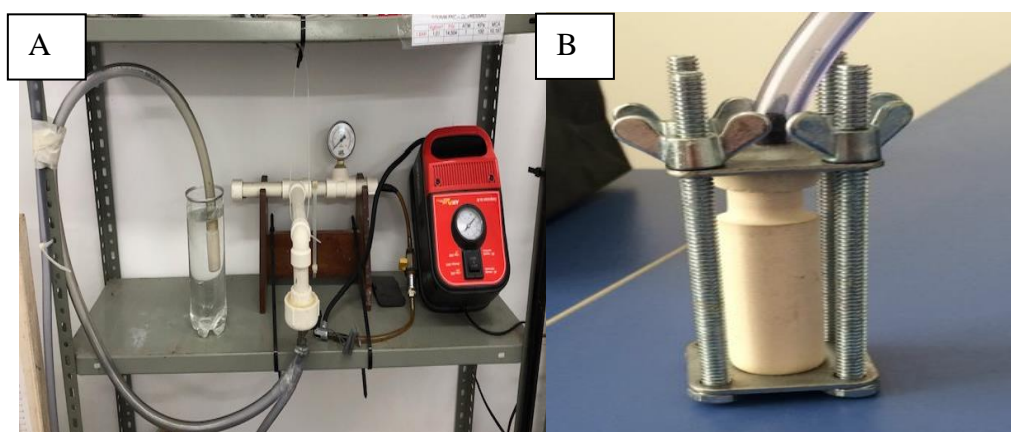
### ***2.2.2 Pressão de borbulhamento, condutância hidráulica e transudação das cápsulas***

A pressão de borbulhamento (P) é definida como o fenômeno em que um fluxo de

ar comprimido passa através das paredes da cápsula saturada. Nos ensaios, as cápsulas foram imersas num recipiente translúcido contendo água destilada, permitindo assim que se visualizassem as borbulhas de ar saindo da superfície exterior da cápsula, conforme Libardi (2012).

No procedimento do ensaio utilizou-se um compressor e uma mini-câmara de pressão (Figura 4), ambos munidos com manômetros previamente aferidos, interligados através de uma tubulação que levava a uma cápsula porosa devidamente saturada e imersa num recipiente translúcido contendo água destilada. O compressor era acionado a uma pressão crescente até 2,5 atm, registrando-se o valor da pressão no momento em que se visualizam as bolhas de ar. Após os testes de borbulhamento, as cápsulas foram novamente submetidas a imagens microscópicas para observação de sua microestrutura física, a fim de analisar alterações físicas nas suas estruturas.

Figura 4 – Equipamento usado para fazer o teste de pressão de borbulhamento (A) e Fixador de capsula (B)



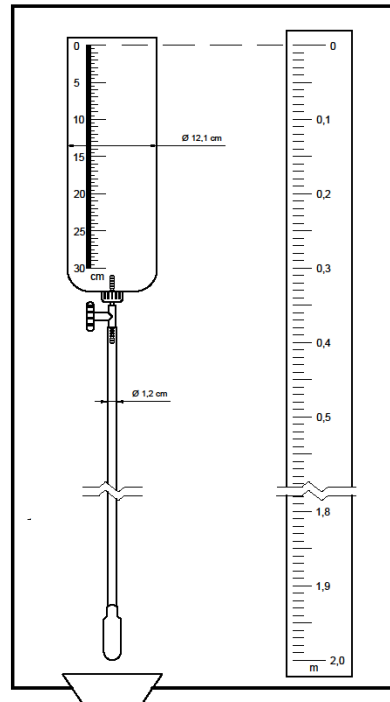
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos ensaios de condutância hidráulica das cápsulas (CH) utilizou-se metodologia preconizada por Libardi (2012), na qual através do permeâmetro de carga variável se, observam e mensuram as relações do fluxo de água através das paredes da cápsula, quando submetida a diferentes pressões decrescentes. A condutância hidráulica mensura a maior ou menor condição de impedimento que um fluxo de água apresenta para passar através das paredes da cápsula. Para o cálculo da condutância usou-se a equação 11, demonstrada anteriormente.

A Transudação ( $q$ ) foi obtida de duas formas, submetidas a carga constante e carga decrescente, ambas através do volume decantado na cuba em função do tempo ( $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$ ) e do

desnível da superfície livre do líquido (cm coluna de água) medidas no permeâmetro de carga constante e carga variável (Figura 5). A capacidade de  $q$  das cápsulas, quando submetidas a diferentes pressões, foram feitas em condição de cápsula “afogada” (Figura 5).

Figura 5 – Equipamento para medidas de transudação de cápsulas sob carga decrescente



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.3 Análise estatística dos resultados

Os dados de  $P$  e  $C$  foram submetidos a estatística descritiva, determinando a média e o desvio padrão dos valores obtidos, a fim de verificar a variabilidade das cápsulas estudadas. Os dados de  $q$  foram submetidos a análise de regressão ( $P < 0,05$ ), para ajuste de modelos da relação de  $q$  em função da pressão exercida na cápsula.

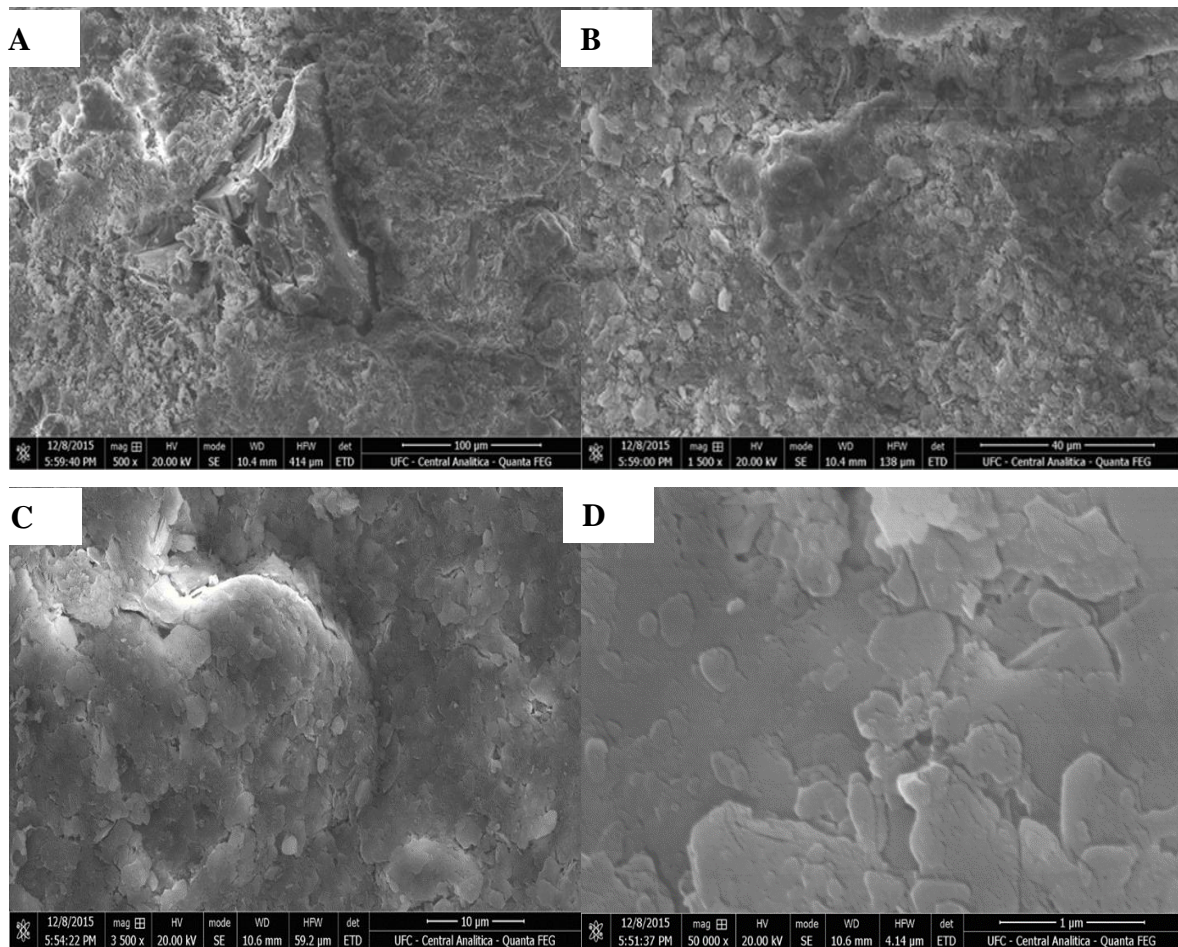
## 2.3 Resultados e Discussão

### 2.3.1 Estrutura investigada através de nano-microscopia

Da análise microscópica efetuada observa-se nas figuras que se seguem que as paredes das cápsulas têm inúmeras condições de passagem de líquido, o que determina sua maior ou menor condutância. Fissuras, microgaléria, arrumação de partícula, agregados e grãos, são fatores que estabelecem a porosidade das cápsulas (Figura 6).

A visão da amostra da cápsula aumentada 500 vezes (Figura 6A) permite observar que ao redor dos agregados, ocorrem fendas que dão origem a concentração de volumes de água sem condição de circulação. Na visão do aumento em 1.500 vezes (Figura 6B), observam-se fissuras que facilitam o movimento da água nas paredes da cápsula. Na visão microscópica aumentada 3.500 vezes (Figuras 6C), os pontos mais claros são os agregados de menor densidade, enquanto que os mais escuros são os de maior densidade. Figura microscópica aumentada 50.000 vezes (Figura 6D), apresenta a disposição “lamelar” das camadas que compõem as paredes das cápsulas.

Figura 6 – Análise microscópica das cápsulas porosas com aumento de 500 vezes (A); 1500 vezes (B); 3500 vezes (C) e 50.000 vezes (D)



Fonte: Elaborado pelo autor.



As aberturas observadas na Figura 6 mostram a variabilidade das cápsulas, as quais não podem ser consideradas homogêneas quanto ao seu uso. Moraes et al. (2006) em estudos sobre avaliação de cápsulas de cerâmica observaram variabilidade em diversos parâmetros, entre estes a condutância hidráulica com desvios de  $12,15 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , além de uma heterogeneidade entre as cápsulas pela origem de fabricação, sendo tal fato ocasionado principalmente pelo matéria prima utilizada para construção das cápsulas nas regiões estudadas.

A concentração dos elementos encontrados através do procedimento da colorimetria, podem ser observados na Tabela 2. As concentrações dos elementos C, O, Al e Si foram predominantes na constituição das cápsulas, fato até hoje não estudado na literatura, já que o uso das cápsulas porosas é apenas para fins práticos (SOCCOL et al., 2005), contudo são necessários estudos sobre a influência destes elementos em contato com o solo e a água, já que podem variar de cápsula para cápsula, e se, de certa forma haveria alguma influência quando tensiômetros são instalados próximos ao sistema radicular das plantas.

Tabela 2 – Concentração de elementos observados nas cápsulas porosas

Elemento		Concentração aparente (%)	Concentração no composto (%)	Composto
Carbono	C	0,72	8,18	C
Oxigênio	O	50,60	56,96	SiO <sub>2</sub>
Magnésio	Mg	0,83	0,80	MgO
Alumínio	Al	17,99	14,80	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Silício	Si	19,56	17,61	SiO <sub>2</sub>
Potássio	K	0,73	0,54	KBr
Titânio	Ti	0,26	0,22	Ti
Ferro	Fe	1,07	0,86	Fe
Bromo	Br	0,01	0,01	KBr

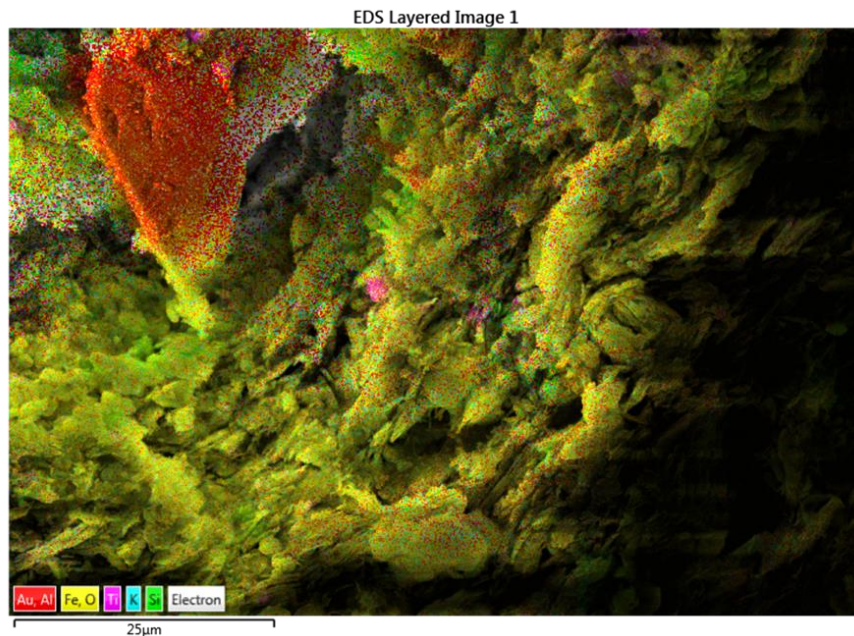
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 7 mostra a dispersão dos compostos químicos das cápsulas porosas. Observa-se em vermelho uma elevada concentração de alumínio e em amarelo de ferro. Essa distribuição desuniforme, pode ser um fator preponderante quanto a homogeneidade das

cápsulas, pois quando completamente preenchidas de água, tais elementos podem influenciar nas passagens de água durante o processo de interação com o solo, havendo uma redução na concentração iônica ocasionada por adsorção de íons (GROVER e LAMBORN, 1970).

Segundo Johnson e Cartwright (1980) as cápsulas de cerâmica podem contribuir para o aumento de certo íons na solução do solo, devido ao processo de diluição de alguns íons quando as cápsulas estão em contato com os solos, como por exemplo uma contribuição significativa de Ca, fato esse também comentado por Silva et al. (2000) utilizando cápsulas porosas como extrator de solução do solo.

Figura 7 – Foto colorimétrica da concentração dos elementos e compostos químicos nas cápsulas porosas.



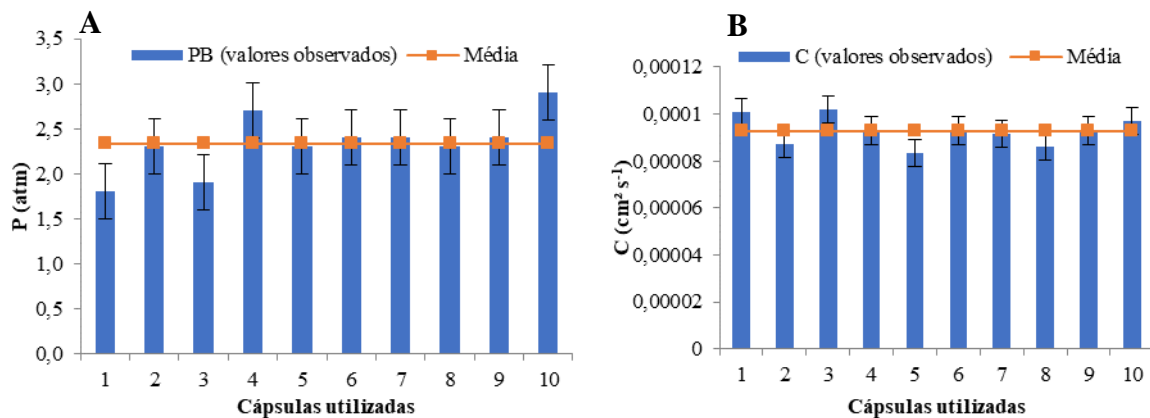
Fonte: Elaborado pelo autor.

### ***2.3.2 Análise dos parâmetros obtidos na cápsula***

A primeira providência a ser tomada quando da escolha das cápsulas, é submeter as cápsulas a pressão de borbulhamento (Figura 8A), observando sua resistência mecânica e medindo o valor específico desta pressão. Através da pressão de borbulhamento podemos testar a resistência mecânica da peça, desobstruir os microporos, dar continuidade às microgalerias, bem como verificar se elas não apresentam rachaduras que comprometam as medidas nelas operadas.

A condutância hidráulica (Figura 8B) da capsula porosa, parâmetro importante para definir sua aplicação e uso, explicita a maior ou menor dificuldade de deixar passar, através de suas paredes, um fluxo de líquido, quando exercida sobre este líquido diferentes pressões.

Figura 8 – Valores de pressão de borbulhamento e condutância hidráulica observadas nas cápsulas estudadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

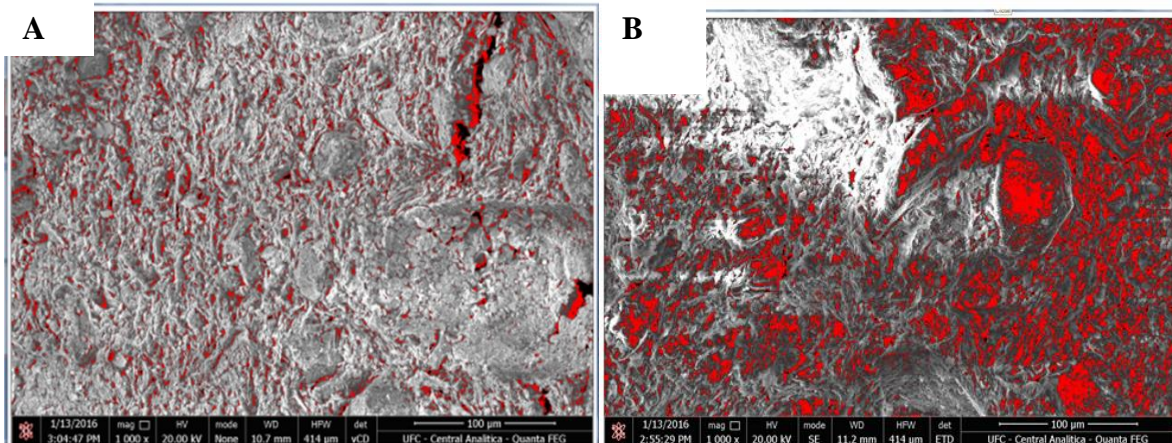
A P média encontra nas cápsulas avaliadas foi de 2,34 atm (Figura 8A), enquanto a CH foi de  $9,27 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  (Figura 8B). A variabilidade mostrada na Figura 6, demonstra a necessidade da escolha de critérios para utilização destas como emissores, já que cápsulas com menores valores de C podem dificultar a passagem de água e conseqüentemente não disponibilizar a quantidade necessária de água para as plantas, contudo, cápsulas porosas com elevado valores de C podem causar problemas de saturação no solo. Silva et al. (2005) demonstram que o uso de cápsulas porosas para irrigação pode ser benéfico na produção de cultivo de meloeiro, contudo, estes autores afirmam que a porosidade drenável é um fator determinante para o uso deste tipo de sistema irrigação.

Os detalhes das paredes das cápsulas porosas antes (Figura 9A) e depois (Figura 9B) do teste de borbulhamento onde as áreas em vermelho caracterizam as passagens contínuas através das paredes. Após o teste de borbulhamento as cápsulas aumentaram suas aberturas de passagem contínua, vez que as passagens foram desobstruídas e novas passagens foram criadas por força do fluxo de ar comprimido, a uma pressão pneumática da ordem de 2,5 atm, que transpassou as paredes das cápsulas.

Tal efeito é de vital importância, para que as cápsulas possam ser utilizadas de diferentes formas, para uso como sensores de umidade do solo, no caso tensiômetros

(TAVARES et al., 2018), como extratores de solução do solo (SILVA et al., 2018) e como emissores para irrigação, que é a proposta deste trabalho.

Figura 9 – Fotografia ampliada em 1000 vezes de cápsulas porosas em condições normais e expostas a pressão de borbulhamento.



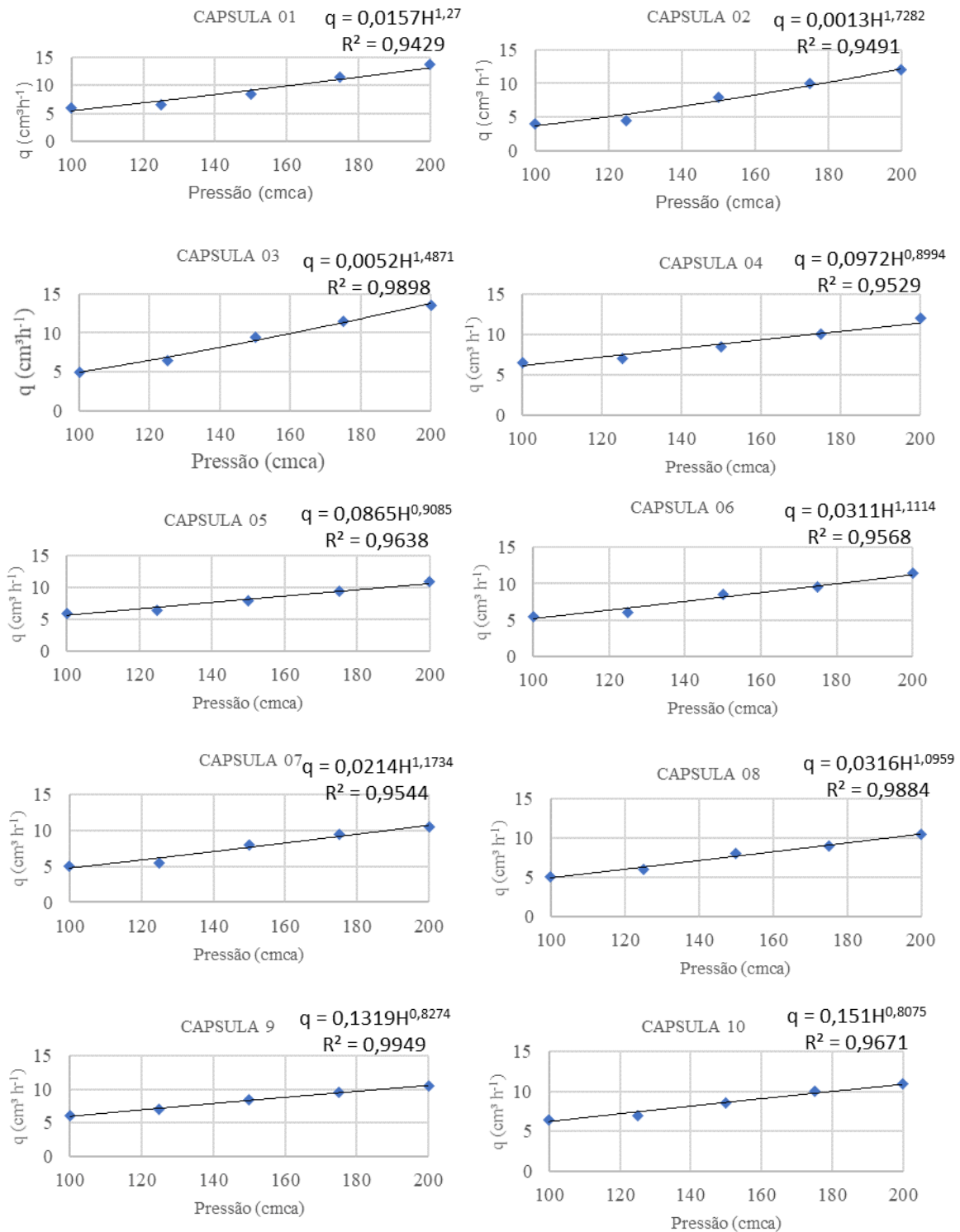
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.3.3 Transudação

A transudação pode ser denominada como a manifestação do volume de líquido ao passar através das paredes da cápsula na medida de um intervalo de tempo considerado. As variáveis pressão e vazão são monotonicamente crescentes, ou seja, quando a variável pressão aumenta, aumenta também o volume transudado. Para utilizar pressão constante no sistema, alimentando os diversos emissores com a mesma pressão, deve-se observar as perdas de carga ao longo do sistema de distribuição, onde a capacidade de condutância de cada cápsula, devem ser consideradas para sua posição no sistema, ou seja cápsulas de menor C devem estar localizadas no início do sistema e as de maiores C no final do sistema.

Conforme pode-se observar (Figura 10), as equações geradas pela relação transudação e pressão ( $q = k \cdot H^x$ ) demonstram além de uma variabilidade elevada de valores entre cápsulas, apresentam em suas equações, valores do expoente “x” maiores que 0,5; o que evidencia que estes emissores devem ser utilizados em regimes de baixa pressão, diferentemente dos emissores convencionais da irrigação localizada (BERNADO et al., 2006; MANTOVANNI et al., 2009), que trabalham em regime turbulento em sua maioria com valores de expoente abaixo de 0,5 (FRIZZONE et al., 1998; FRIZZONE et al., 2012; PRADO et al., 2014).

Figura 10 – Relação vazão x pressão contínua nas cápsulas porosas utilizadas para o sistema de irrigação

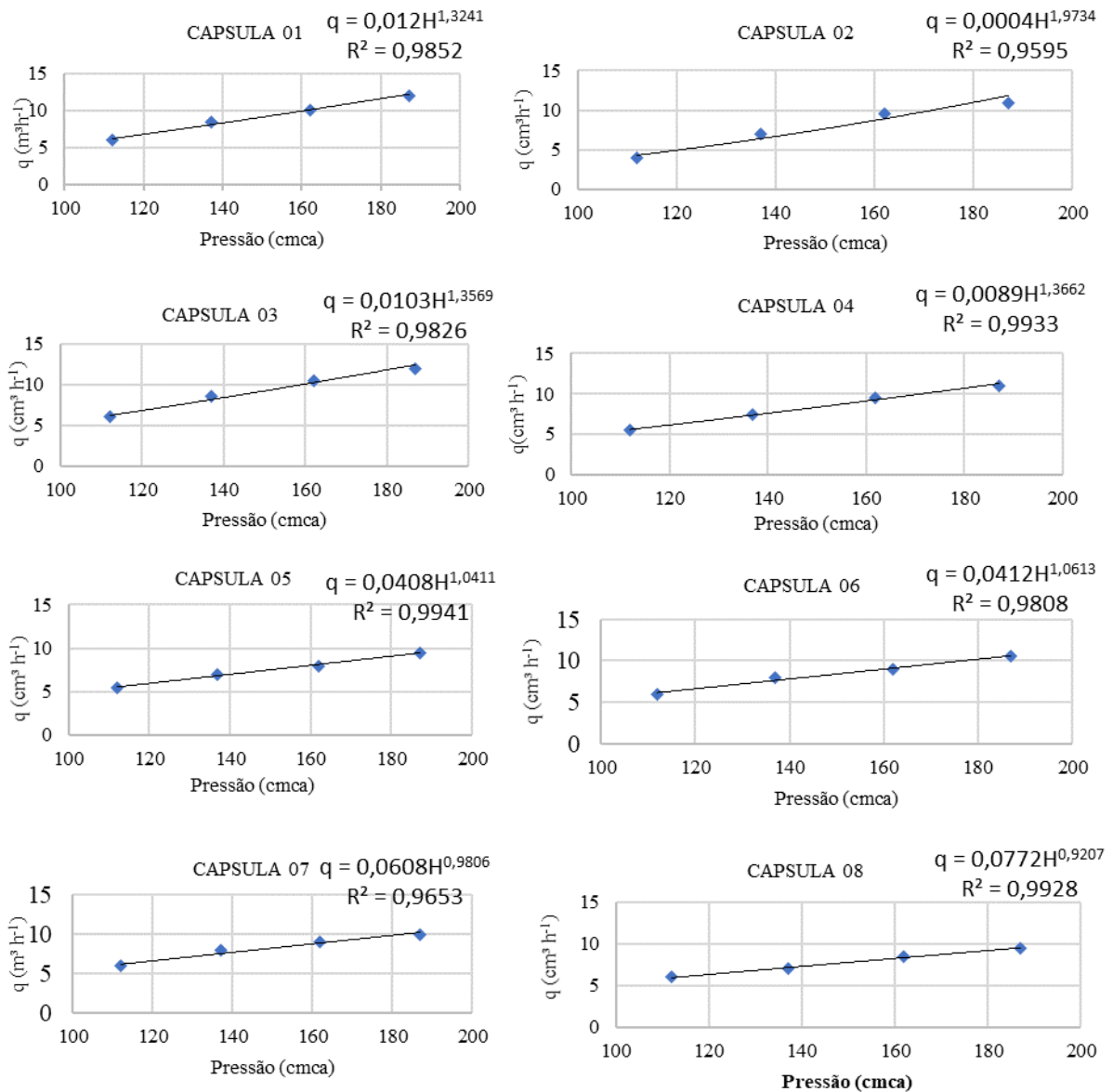


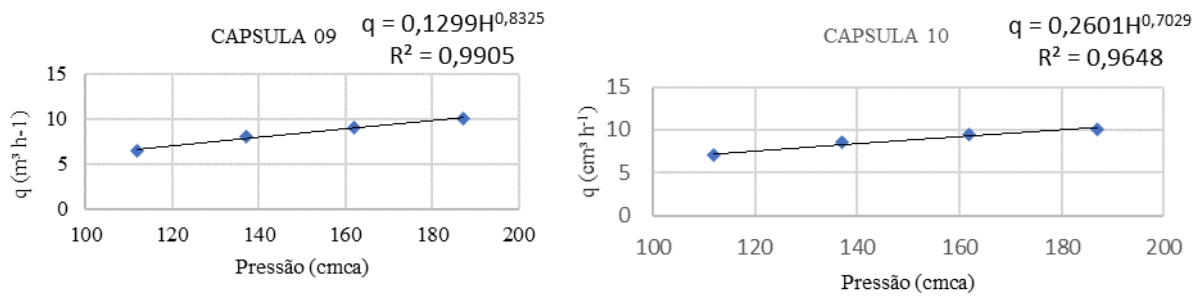
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando submetida a cargas decrescentes, as cápsulas (Figura 11) continuaram

apresentando o mesmo comportamento, observados na Figura 10, ou seja, regimes de baixa pressão. A necessidade de demonstrar os valores da variável q sob os regimes de carga constante e variável se dá para comprovar a variabilidade das cápsulas independente do regime adotado, onde as fissuras responsáveis pela passagem da água não são uniformes. Portanto o uso destas como emissores devem ser realizadas com cautela, pois independente do regime de pressão a variabilidade de emissão de água pode ser de até 17%, valor acima dos critérios de dimensionamento de sistemas com menores eficiências como a aspersão (MANTOVANI et al., 2009), quando comparada ao sistema localizado.

Figura 11 – Relação vazão x pressão decrescente nas cápsulas porosas utilizadas para o sistema de irrigação





Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.4 Conclusões

A baixa uniformidade das cápsulas porosas, devido à natureza de sua fabricação, é fator determinante para que avaliações sejam feitas antes do seu uso, para determinado fim.

A recomendação do uso de cápsulas porosas como emissores para irrigação localizada é a de que e as mesmas apresentem baixos valores de condutância hidráulica ( $1,50 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) e alta pressão de borbulhamento (2,5 atm), constituindo em critério determinante para que o sistema funcione com adequada uniformidade.

### 3 FORMAÇÃO DO BULBO MOLHADO A PARTIR DA CAPSULA POROSA

#### Resumo

A matriz do assunto reside na irrigação localizada subterrânea neste caso específico estuda-se o fenômeno em que a água após transpassar as paredes da cápsula, misturasse com material orgânico e minerais existente no solo formando a “solução do solo”. Dependendo da permeabilidade do solo, particularidade que varia com a textura, inicia-se a formação do bulbo molhado, momento em que a solução do solo umedece pontualmente um volume de solo, dando origem ao bulbo que circunda o sistema radicular das plantas. Esta particularidade se notifica por consumir menor volume de água de irrigação, minimiza a percolação e a lixiviação de nutrientes. Após a água transpassar as paredes da cápsula, no processo de transudação, observa-se a origem da solução do solo, ou seja, a água entra em contato com os minerais e com material orgânico encontrada no interior do solo. A solução do solo se desloca por diferenças de pressão, ocorrendo dos pontos de maior pressão para os pontos de menor pressão. Este fenômeno é levado à efeito por conta da diferença de pressão entre o volume de solo do entorno do sistema radicular das plantas e a cápsula repleta de água no interior do solo. A necessidade de conhecer a geometria do bulbo molhado provocado pelo fluxo de água que passa através das paredes da cápsula porosa, está relacionada ao volume de água realmente utilizada para sobrevivência das plantas. A baixa velocidade com que o fluxo de água após passar pela capsula porosa se espalha no interior do solo influência sobremaneira no volume do bulbo molhado. Observou-se que as forças de coesão que mantêm a unidade do bulbo molhado deverão ser sempre maiores do que o valor da massa inercial do volume de água contida no bulbo. Por meio de um conjunto de procedimentos e equipamentos utilizados na presente proposta, conseguiremos visualizar a “anatomia” do bulbo molhado em condições de *steady-state*, a velocidade com que o bulbo se desenvolve e a quantificação do volume de água aplicada na formação dos mesmos. Estas variáveis, que se relacionam entre si, vão promover significativas informações que veremos ao longo do trabalho. A quantificação de variáveis permitida para o dimensionamento do bulbo, foi seguramente calculada a fim de definir um correto regime de irrigação.

**Palavras-chave:** Bulbo molhado; bulbo úmido.



## **Abstract**

The matrix of the subject lies in the underground irrigation located in this specific case is studied the phenomenon in which the water after crossing the walls of the capsule, mixed with organic material and minerals existing in the soil forming the "soil solution". Depending on the permeability of the soil, particularity that varies with the texture, begins the formation of the wet bulb, at which time the solution of the soil moistens punctually a volume of soil, giving rise to the bulb that surrounds the root system of the plants. This particularity is reported by consuming less volume of irrigation water, minimizing percolation and nutrient leaching. After the water passes through the walls of the capsule, in the process of transudation, we observe the origin of the solution of the soil, that is, the water comes in contact with the minerals and with organic material found inside the soil. The soil solution is displaced by pressure differences, occurring from the points of greatest pressure to the points of least pressure. This phenomenon is carried out due to the pressure difference between the soil volume of the plant root system environment and the water - filled plant inside the soil.

The need to know the geometry of the wet bulb caused by the flow of water passing through the walls of the porous capsule is related to the volume of water actually used for plant survival. The low speed with which the flow of water after passing through the porous capsule spreads inside the soil influences greatly on the volume of the wet bulb. It was observed that the cohesive forces maintaining the unit of the wet bulb should always be greater than the value of the inertial mass of the volume of water contained in the bulb.

By means of a set of procedures and equipment used in the present proposal, we will be able to visualize the "anatomy" of the wet bulb under steady-state conditions, the speed with which the bulb develops and the quantification of the volume of water applied in the formation of the bulbs . These variables, which are related to each other, will promote significant information that we will see throughout the work.

The quantification of variables allowed for bulb sizing was surely calculated in order to define a correct irrigation regime.

**Keywords:** Wet bulb

### **3.1 Introdução**

O bulbo úmido se forma a partir de uma fonte pontual de água no solo que se

propaga tridimensionalmente com a frente de molhamento (ELAIUY, 2012). Informações da geometria do bulbo molhado são importantes para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume de solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de aplicação de água (MAIA et al. 2010).

As dimensões do bulbo úmido dependem, sobretudo, dos seguintes fatores: estrutura e textura do solo, vazão do gotejador, frequência de aplicação e umidade inicial do solo (ELAIUY, 2012).

Conforme Souza et al. (2015), as informações de profundidade e de largura do bulbo molhado no solo são importantes para que seja possível efetuar o correto manejo da irrigação, auxiliando na quantidade de água a ser aplicada na planta, desta maneira tendo um adequado planejamento de irrigação, verificando a necessidade hídrica das plantas e principalmente a umidade do solo em diferentes profundidades, se faz necessário que a água do solo seja monitorada constantemente com o objetivo de observar a eficácia do manejo de irrigação bem como acompanhar a umidade do solo no local da zona radicular.

A textura do solo é um fator preponderante na geometria do bulbo, no volume armazenado e no manejo da irrigação (KELLER & BLIESNER, 1990). No método de irrigação localizada os gotejadores como emissores são os mais usados; propiciam a formação de bulbos que nascem da infiltração da água no solo e se avolumam com a percolação em função de uma vazão propiciada pela pressão aplicada ao sistema, em tempo e volume que podem ser dimensionados (LUBANA & NARDA, 1998).

É de fundamental importância remarcar que os princípios teóricos fundados na Lei de Darcy (1856) para o estudo de fluxo de água em solos saturados, posteriormente generalizada para fluxo de água em solos não saturados (BUCKINGHAN, 1905), foram observados na análise das formações dos bulbos.

O movimento da água no solo pode ocorrer em condições saturadas, situação em que todos os poros do solo estão preenchidos com água, e em condições não saturadas, quando apenas parte dos seus poros estão preenchidos com ar (ARRAES, 2014).

Dentre as propriedades físicas, a capacidade de retenção de água de um solo em potenciais mátricos específicos e a condutividade hidráulica são, talvez, as mais importantes, já que a partir delas o fluxo de água e solutos na região não saturada do solo é mais facilmente mensurável (ANGELOTTI NETTO, 2007).

A teoria clássica para os fenômenos de permeabilidade, considerando fluxos laminares homogêneos, é baseada na lei expressa a partir dos experimentos de Henry Darcy de 1856 (SCHEIDEGGER, 1974). A lei de Darcy pode ser entendida como um caso particular

da equação de conservação de momento linear de um fluido newtoniano incompressível que escoar em um meio poroso rígido completamente saturado por este fluido (CORREA, 2006).

### 3.2 Material e Métodos

O objetivo dos ensaios efetuados no estudo na formação do bulbo é dimensionar um bulbo com o maior volume em condição limiar de percolação, formado pela aplicação de um fluxo de água através das capsulas, condicionado por diferentes pressões, em um solo de textura conhecida, na procura de um conforto hídrico desejado pela cultura do rabanete.

A geometria do bulbo também depende da forma física e da pressão de trabalho do emissor. Em ensaios com equipamentos desenvolvidos em laboratório da UFC, colocamos amostras de solos de texturas diferentes, em um depósito translúcido, munido de sensores de umidade e temperatura, postos em formação helicoidal em torno da cápsula, capaz de mensurar as pressões e temperaturas no interior do solo. À medida que a água transpassa as paredes da cápsula e umedece o solo podemos visualizar não só a forma, mas também medir o volume do bulbo, e com que velocidade a umidade se expande nos solos analisados.

Informações sobre a geometria dos bulbos molhados em solos de diferentes texturas é de fundamental importância na medida que nos permite dimensionar o raio de ação e a velocidade com que o fenômeno se processa. No curso do presente trabalho desenvolvemos um equipamento capaz de visualizar a evolução do bulbo molhado, mensurá-lo e calcular a velocidade com que o mesmo se expande dentro do solo. Para cada tipo de solo usamos cargas hidráulicas diferentes, tendo em vista que nosso intuito é de conseguir o maior bulbo possível, sem percolação de fuga, com a umidade no volume de solo cuja tensão esteja em torno de 10kPa.

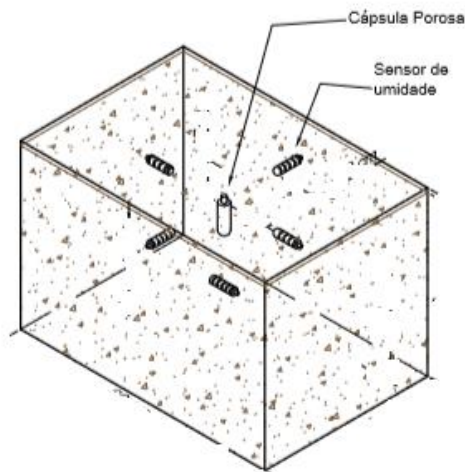
Sensores de umidade e temperatura, Watermark 253 e Termocouple respectivamente e um datalogger modelo CR23X Micrologge e um multiplexador AM 16/32 ligados a um computador usando um programa PC208W, Versão3.1”, foram colocados ao redor da cápsula em formação helicoidal no interior do recipiente contendo amostra de solo, cujo resultado demonstra a relação inversa entre o volume de água aplicada e o decréscimo dos valores de tensão no solo.

Amostra de solo seco ao ar, com um volume de 7.980 cm<sup>3</sup> foi colocada em um recipiente translúcido, cuja capacidade é de 8.000 cm<sup>3</sup> a cápsula foi colocada no centro geométrico da amostra, a uma profundidade de 7,5 cm, e os sensores de pressão e temperatura em número de quatro dispostos em forma helicoidal em torno da cápsula, em distâncias

espaçadas de 2,5 cm, e um quinto sensor no fundo do recipiente, a uma profundidade de 15 cm, para detectar a condição de percolação, todo sistema interligado a um equipamento CR23X Micrologger, que efetuou leitura de umidade e temperatura a cada 15 minutos.

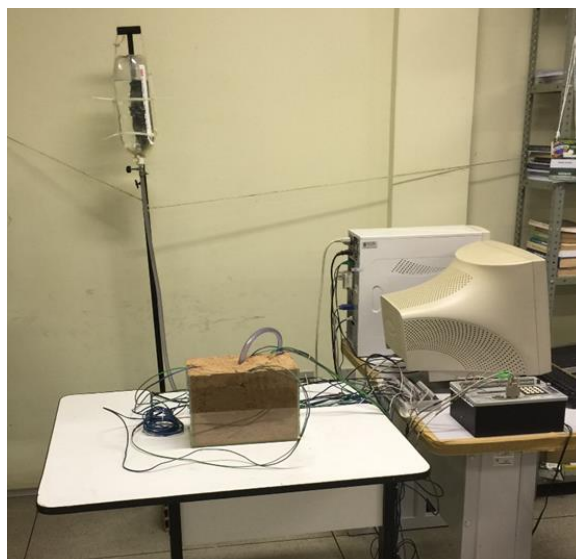
Os valores medidos nos sensores com suas respectivas temperaturas, serão tratados em um software que permite traduzir os valores lidos em pressão, mas particularmente em kPa. As distâncias entre os sensores S1, S2, S3 e S4 é de 2,5 cm, enquanto o S5 encontra-se a 15 cm da superfície externa da amostra do solo que se encontra no interior do recipiente, ilustrado na FIGURA 12 e 13.

Figura 12 – Disposição dos sensores e capsula no recipiente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Foto do sistema de mensuração do bulbo



Fonte: Elaborado pelo autor.

São várias as formas de utilização dos sensores no processo de irrigação, quantificar a intensidade da umidade no solo, pressão da água no interior do solo, dentre outros estímulos não menos importante hoje encontramos nos sensores de resistência elétrica, uma ferramenta de grande valia no manuseio da água no solo. Estes sensores são capazes de traduzir os sinais de atividades no interior do solo, permitindo que decisões assertivas sejam tomadas, após leitura de dados compilados.

O estudo das relações das pressões medidas pelo equipamento e a umidade no interior do solo, umidade com base em volume, foi de fundamental importância como pode ser visto nas demonstrações apresentada no trabalho.

A umidade com base em volume, representado pela letra grega  $\theta$ .

$$\theta \% = \frac{V_w}{V_b} \times 100$$

em que:

$V_w \Rightarrow$  Volume de água em  $\text{cm}^3$

$V_b \Rightarrow$  Volume do bulbo em  $\text{cm}^3$

$\theta \% \Rightarrow$   $\text{cm}^3$  de água /  $100 \text{ cm}^3$  de solo do bulbo

Foi utilizado uma amostra de solo de Classe Textural “argilo-arenoso” (USDA), contendo 72% de areia, 10% de argila e 18% de silte; a análise do solo foi feita no Departamento de Solos do Centro de Ciências Agrárias da UFC.

A amostra por ter uma fração arenosa de 72%, portanto sendo um solo leve, de fácil drenagem, optamos pela escolha de uma carga hidráulica baixa e uma cápsula com baixa condutância, para que não tivéssemos uma percolação indesejável. A escolha recaiu sobre a capsula nº 10 que tem uma vazão de  $6,50 \text{ cm}^3/\text{h}$ , a uma pressão constante de 100 cca, e em condição de pressão média no intervalo 125 – 100 cca de  $7,0 \text{ cm}^3/\text{h}$ , trabalhando em ambos os casos de forma afogada, que é a condição em que a cápsula se encontra dentro de um recipiente cujo nível de água no seu interior é mais elevado que a cápsula em posição vertical. Sabendo que no sistema de emissão por cápsula no interior do solo, as vazões se alteram segundo a textura do solo.

A amostra ensaiada de solo, solo seco ao ar, classificada como solo franco-argilo-arenoso (USDA), analisada pelo Departamento de Solos do Centro de Ciências Agrárias da UFC, contém 61% de areia, 33% de argila e 6% de silte, portanto com 39% de material mais fino, nos levando a escolher uma carga média e uma cápsula de condutância

baixa.

A escolha recaiu sobre a cápsula nº 08 que permite uma vazão de 6,50 cm<sup>3</sup>/h, a uma pressão constante de 125 cca, e em condição de pressão média no intervalo 125 – 100 cca de 6,00 cm<sup>3</sup>/h, em ambos os casos trabalhando de forma afogada.

### 3.3 Resultados e Discussão

#### 3.3.1 Evolução do bulbo molhado na amostra de solo

Mas coluna S1, S2, S3, S4, S5 teremos as diferentes profundidades em que se encontram os sensores, com suas medidas de pressão em kPa. A umidade em porcentagem de volume, representado pela letra grega  $\theta$ .

Tabela 3 – Tabela de dados

SOLO 02	$\Delta H=135-120$	cca	Vbulbo=>	6594	cm <sup>3</sup>			
TEMPO	H	VOLUME	S1 = 2.5cm	S2=5.0cm	S3=7.5cm	S4=10cm	S5=15cm	$\theta$
hs	cm	cm <sup>3</sup>	kPa (-)	kPa (-)	kPa (-)	kPa (-)	kPa (-)	%
0	135	0	85.93	86.89	43.87	46.87	90.46	—
25	133.9	172.5	79.46	86.50	22.23	38.58	84.94	2.6
48	132.5	287.5	27.60	86.03	13.03	37.71	78.31	4.4
69	131.5	402.5	21.87	44.83	12.44	34.53	31.55	6.1
141	128.0	805.0	19.29	28.23	12.18	27.18	23.16	12.2
160	126.5	977.5	17.71	24.71	11.43	16.51	18.86	14.8
184	125.5	1092.5	17.59	24.01	11.46	15.63	18.35	16.6
208	124.5	1207.5	17.88	23.85	11.64	15.27	18.49	18.3
227	123.5	1322.5	14.08	18.20	9.54	11.82	13.82	20.1
303	120.0	1725.5	11.61	13.65	9.37	9.20	10.19	26.2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os solos franco–argilo–arenoso, em 303 horas de água transudada a umidade desenhou uma Figura geométrica de forma elíptico, como pode ser observado na Figura 43, dando origem a um bulbo com 6 594 cm<sup>3</sup> de volume, conforme cálculo explicitado abaixo, contendo 1725,5 cm<sup>3</sup> de água no seu interior a uma pressão média em torno de 10,9 kPa, quando submetido a uma pressão decrescente no intervalo de 135 a 120 cca, tendo como emissor uma capsula porosa de condutância e vazão conhecida.

#### 3.3.2 Cálculo do volume do bulbo

Área da elipse  $A = a \cdot b \cdot \pi$

Para  $\Delta H = 135 - 120 : 15$  cca

Volume do bulbo  $V_{B2} = (a \cdot b \cdot \pi) 15$

Aonde:

$a = 19$  cm (raio maior);

$b = 9$  cm (raio menor);

$\pi = 3,14$  ( $\pi \Rightarrow$  pi);

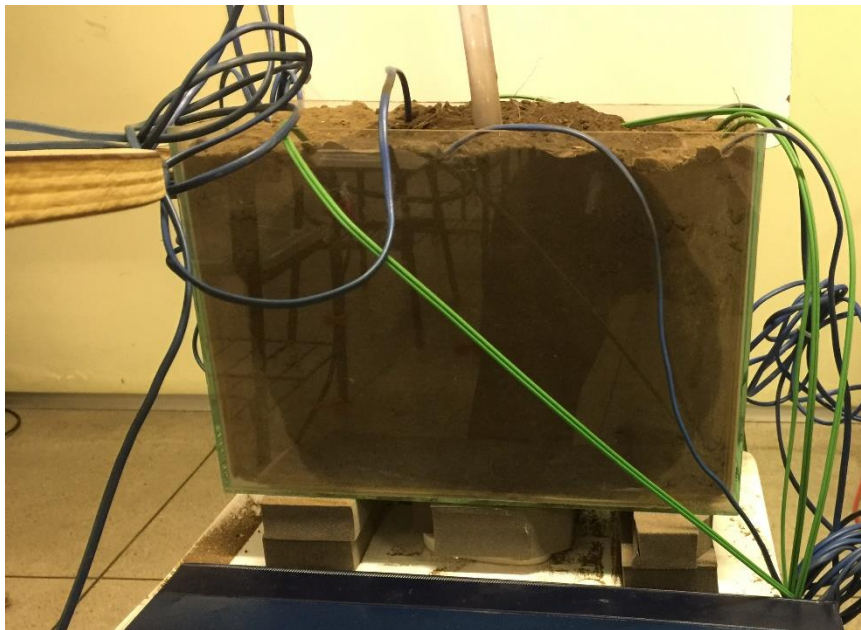
Largura do recipiente aonde está depositado a amostra de solo = 15 cm

$V_{B2} = 6\,594 \text{ cm}^3$
--------------------------------

Calculando a vazão média no intervalo, teremos:

Vazão =  $1725,5 / 303 = 5,69 \text{ cm}^3/\text{h}$

Figura 14 – Visualização do bulbo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 Conclusão

Observa-se que a vazão média é de  $5,69 \text{ cm}^3/\text{h}$ , aqui encontrada é inferior em 5,16 % a vazão aferida para pressões de mesmo nível que é de  $6,00 \text{ cm}^3/\text{h}$  quando a capsula se encontra em regime de trabalho afogada, tanto em situação de pressão decrescente quanto a

pressão constante, o que nos leva a certificar que para esta textura de solo da amostra , a vazão diminui, conforme observação do Tabela acima.



## 4 PRODUÇÃO DE RABANETE COM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR CÁPSULAS POROSAS

### Resumo

Há diversos usos para as cápsulas porosas na agricultura, contudo estas devem ser caracterizadas por parâmetros de avaliação. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento da cultura do rabanete sob sistema de irrigação por cápsula porosa. Para o sistema de irrigação proposto, utilizaram-se dez cápsulas porosas na execução do ensaio experimental que consistiu em um delineamento inteiramente casualizados com três tratamentos, constando de diferentes manejos de irrigação (manejo via clima, via solo e via cápsula porosa) com 10 repetições, totalizando 30 unidades experimentais, a cultura escolhida foi o rabanete, sendo avaliados parâmetros de produção: matéria fresca e seca da parte aérea, raiz e comprimento das plantas. Para a cultura em estudo, não foram observadas diferenças entre os tratamentos estudados, onde a massa fresca da raiz apresentou valores de 7,4 g planta<sup>-1</sup> para o manejo via clima e 4,7 g planta<sup>-1</sup> para o manejo via cápsula porosa, não sendo estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). O uso de sistemas de irrigação por cápsulas porosas, apresenta-se como uma alternativa para o cultivo de hortaliças em pequenas áreas.

**Palavras-chave:** Pressão de borbulhamento; Condutância hidráulica; Emissor.

### Abstract

There are several uses for porous capsules in agriculture, however these should be characterized by evaluation parameters. The objective of this work was to evaluate the development of radish culture under a porous capsule irrigation system. For the proposed irrigation system, ten porous capsules were used in the execution of the experimental test, which consisted of a completely randomized design with three treatments, consisting of different irrigation managements (management via soil, via soil and via porous capsule) with 10 replications, totaling 30 experimental units, the selected crop was the radish, being evaluated production parameters: fresh and dry matter of the aerial part, root and length of the plants. For the study culture, no differences were observed between the treatments studied, where the fresh root mass presented values of 7.4 g plant<sup>-1</sup> for the management via climate

and 4.7 g plant<sup>-1</sup> for handling via porous capsule , and were not statistically different by the Tukey test ( $p < 0.05$ ). The use of porous capsule irrigation systems is an alternative for growing vegetables in small areas.

**Keywords:** Bubbling pressure; Hydraulic conductance; Emitter.

#### 4.1 Introdução

O método de irrigação localizada é largamente utilizado na produção agrícola, sua característica maior é a aplicação da água junto ao sistema radicular da planta, beneficiada com utilização de água bem inferior em volume, se comparado aos outros métodos de irrigação (BERNARDO et al., 2006). O emissor é o grande artífice do sistema de irrigação localizada (PRADO et al., 2014; FRIZZONE et al., 1998), tendo em vista que sua característica maior é o controle de pequenas vazões embora trabalhando sob forma pressurizada (MANTOVANI et al., 2009).

A irrigação localizada se desenvolveu em função da escassez de água, pois como aplica água em apenas parte da área, reduz a superfície molhada do solo exposta às perdas por evaporação, fazendo com que dessa maneira se tenha maior eficiência de aplicação se comparada a outros sistemas (FRIZZONE et al., 2012; BERNARDO et al., 2006; MANTOVANI et al., 2009). Nos últimos anos, tal sistema tem apresentado significativo crescimento, ocupando dentro das áreas irrigadas maior espaço, mostrando-se como atividade promissora para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil, principalmente pelo uso da fertirrigação (SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2016).

Apesar de serem utilizadas como emissores, as cápsulas porosas apresentam elevada heterogeneidade devido ao material de sua fabricação ser naturalmente poroso (MORAES et al., 2016; SOCCOL et al., 2005), o que interfere na uniformidade do sistema, devendo assim, antes de sua utilização, serem avaliadas para o seu uso. Trabalhos como os de Silva et al. (2005) apontam para a viabilidade neste sistema em pequenas áreas, tendo como vantagem a redução da evaporação no sistema, já que seus emissores funcionam enterrados no solo. Outra vantagem está relacionada às baixas pressões requeridas para o funcionamento do sistema já que estes emissores trabalham em baixas pressões, diferentemente de outros sistemas localizados (ALMEIDA et al., 2016), o que reduz os custos de implementação.

Contudo, há uma necessidade de estudos sobre esse sistema, que devido a pouca exploração e quantidade de informação, acaba sendo pouco utilizado. Neste contexto, cabe

destacar que o sistema com cápsulas porosas tem potencial para requerer menor pressão que os sistemas de irrigação localizada atualmente utilizados (BURT e STYLE, 1994; FRIZZONE et al., 2012), o que pode ser uma vantagem para a produção em pequenas hortas e jardins, pois a tendência em algumas regiões é a produção de hortas residências ou em cinturões urbanos (LIZ, 2006) como alternativa para consumo de alimentos sem uso de produtos químicos (SILVA et al., 2019).

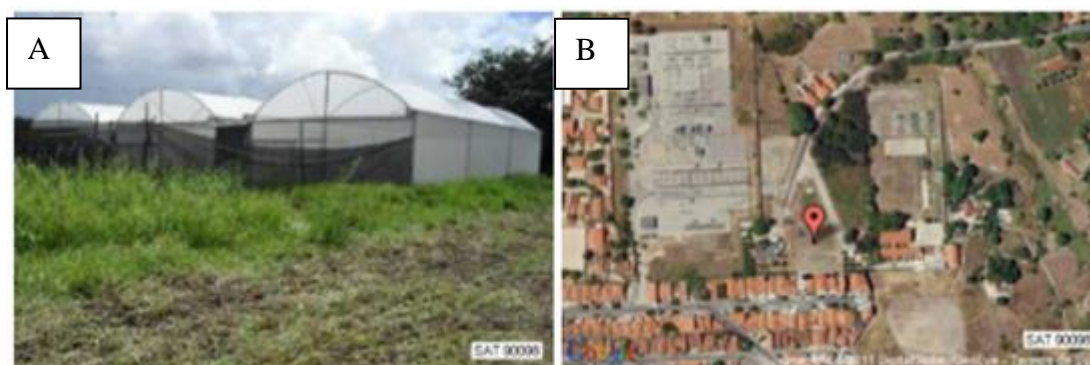
Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar um sistema de irrigação localizada com emissores de cápsulas porosas em relação aos tradicionais manejos de irrigação utilizados nos demais sistemas de irrigação localizados, para a cultura do rabanete.

## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Área experimental

Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, localizada nas coordenadas geográficas de 3° 44' 43.273" de latitude sul e 38° 34' 56.650" de longitude oeste, entre os meses de outubro e novembro de 2017, precisamente na Estação Agrometeorológica, em casa de vegetação. A casa de vegetação tem as dimensões de 75 m<sup>2</sup>, com 6,25 metros de largura e 12 metros de comprimento, coberta com filme de polietileno de baixa densidade com 0,10 mm de espessura (Figura 12A).

Figura 15 – Estação Agrometeorológica da UFC



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.2 Escolha da cultura e tratos culturais

A cultura escolhida foi o rabanete (*Raphanus Sativus*) devido ao seu curto tempo de cultivo além de representar hortaliças produzidas em pequenas áreas. A semeadura foi realizada em vasos com capacidade de 4.537 cm<sup>3</sup>. Foram inseridas quatro sementes por cova, em um espaçamento de 0,10 m entre plantas. Após a emergência das plantas, foi realizado o desbaste, deixando apenas quatro plantas por vaso. O solo possuía textura do tipo franco argilo arenosa (Embrapa 2013) conforme Tabela 3. Os atributos químicos do solo utilizado no experimento são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Atributos físicas do solo utilizado no experimento

ds	Ko	Granulometria			Textura
		Areia	Silte	Argila	Classificação
g cm <sup>-3</sup>	cm	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
	min <sup>-1</sup>		-		
1,24	0,11	610	60	330	

ds– densidade do solo; Ko – condutividade hidráulica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Atributos química do solo utilizado no experimento

CE	pH	M.O	N	P	S	K	Ca	Mg	Na	H+Al	V
dS m <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> O	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----						%
0,05	5,5	0,83	0,05	31	1,6	0,12	1,10	0,20	0,13	1,32	11

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; M.O. – matéria orgânica; N – nitrogênio; P – fósforo; S – enxofre, K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Na – sódio; H+Al– acidez potencial; V (%) – saturação por bases

Fonte: Laboratório de solos/água – Funceme (2016)

Devido a necessidade de aumentar a fertilidade do solo, uma adubação de cobertura foi realizada via composto orgânico elaborado com esterco de caprino (Tabela 5), afim de suprir a necessidade nutricional da cultura.

Tabela 6 – Atributos químicos do composto para adubação de cobertura

Atributos químicos	Profundidade (0 – 0,3m)
Cálcio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	14,00

Magnésio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	9,20
Sódio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	1,14
Potássio (mg/dm <sup>3</sup> )	1690
Hidrogênio + Alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	1,00
Alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,00
Soma de bases (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	28,20
CTC (t) (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	28,20
CTC (T) (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	28,30
Matéria Orgânica (g kg <sup>-1</sup> )	14,30
Fósforo Assimilável (mg kg <sup>-1</sup> )	314,7
Ferro (mg/dm <sup>3</sup> )	26,9
Cobre (mg/dm <sup>3</sup> )	0,4
Zinco (mg/dm <sup>3</sup> )	20,4
Manganês (mg/dm <sup>3</sup> )	100,3
pH em água (1:2,5)	6,9

Fonte: Laboratório de solos/água – Funceme (2016)

#### **4.2.3 Delineamento experimental e tratamentos**

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com dez repetições. Os tratamentos foram constituídos de três manejos da irrigação: manejo da irrigação via clima (MIC), manejo da irrigação via solo (MIS) e manejo da irrigação com uso de cápsulas porosas (MICP), totalizando assim 30 unidades experimentais. Cada unidade experimental era representada por um vaso com quatro plantas, separadas num espaçamento de 0,10 m.

O MIC foi realizado com base em dados obtidos pelo tanque classe A (SNYDER, 1992) e coeficiente de cultivo (DOORENBOS e PRUITT, 1977), conforme (ALLEN et al., 1998), determinando assim a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>). Obtido os valores da ET<sub>c</sub> diariamente e de posse da área dos vasos, foi determinado o volume da água sendo aplicada nos vasos com o auxílio de recipiente graduado. A ET<sub>c</sub> pode, portanto, ser determinada conforme equação (13) abaixo:

$$ET_c = ET_o . Kc \quad (13)$$

Em que:

ET<sub>c</sub> – Evapotranspiração da cultura (mm dia<sup>-1</sup>);

ET<sub>o</sub> – Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);  
K<sub>c</sub> – Coeficiente de cultivo da cultura do rabanete.

O MIS foi realizado com base em dados de tensão de água no solo (kPa) medidos diariamente, através de tensiômetros de punção, obtendo-se a umidade do solo pela curva característica (Figura 13) e cálculo da lâmina de irrigação (MANTOVANI et al., 2009), conforme equação (14):

$$IRN = (U_{cc} - U_{atual}) \times ds \times Z \quad (14)$$

Em que:

IRN – Irrigação Real Necessária (mm);

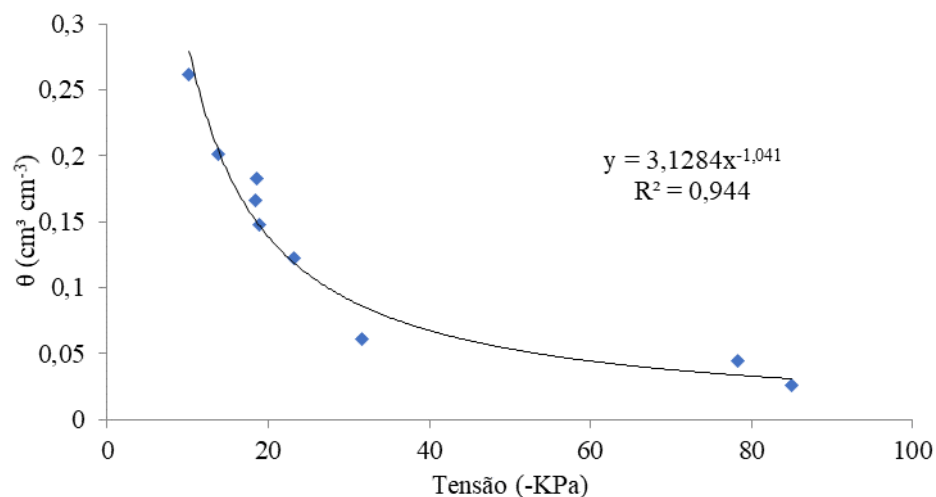
U<sub>cc</sub> – Umidade na capacidade de campo (g g<sup>-1</sup>);

U<sub>atual</sub> – Umidade atual em que se encontra o solo (g g<sup>-1</sup>);

ds – Densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>);

Z – Profundidade do sistema radicular (mm).

Figura 16 – Curva característica do solo utilizado

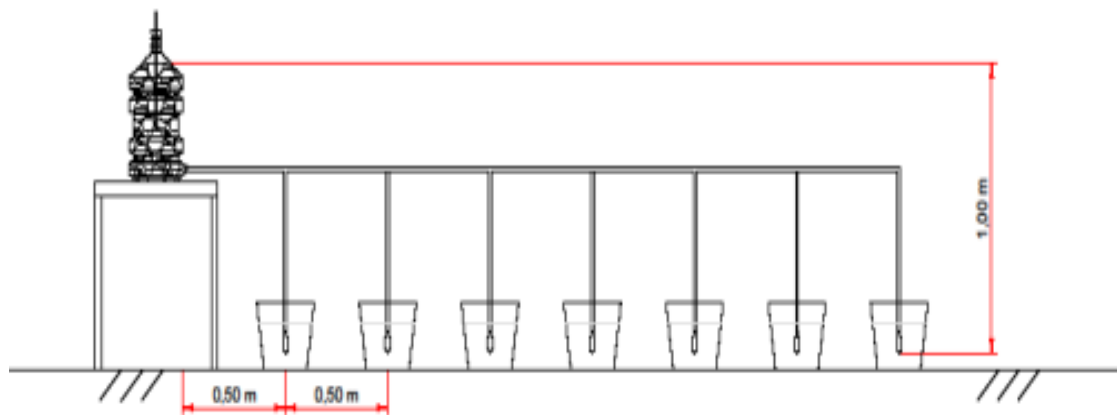


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o MICP, foi elaborado um sistema de irrigação localizada em que as cápsulas porosas são os emissores. Os dados de P, C e q anteriormente explicados, nortearam a disposição espacial e o cálculo do sistema, ou seja, quanto maiores os valores de P, C e q das cápsulas, mais distantes da fonte alimentadora de água estas ficaram. Para melhor entender o

funcionamento do sistema, foi utilizando um garrafão translúcido de 20 L, devidamente aferido quanto ao volume e altura da coluna de água, munido de um registro de saída conectando-se a uma tubulação de plástico de 2,00 m de comprimento e 1,2 cm de diâmetro interno, qual seja a tubulação de alimentação, conectada a tubulação de alimentação está à tubulação de distribuição que por sua vez se conecta ao sistema emissor ao qual as capsulas estão fixadas (Figura 14).

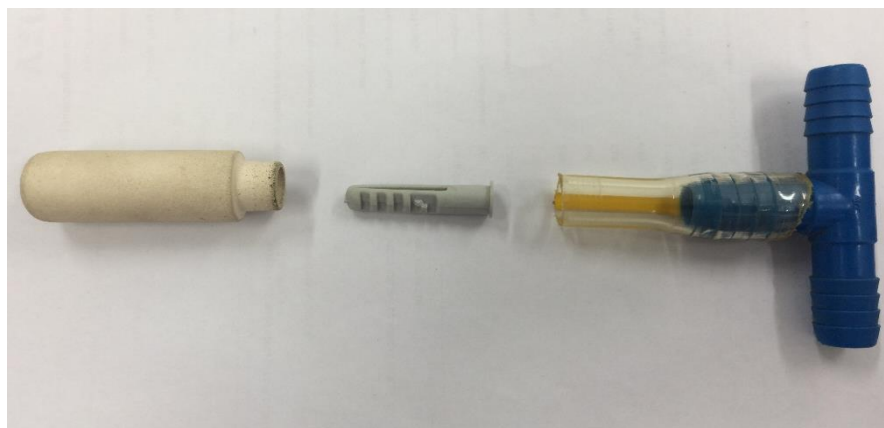
Figura 17 – Sistema de irrigação por cápsulas porosas



Fonte: Elaborado pelo autor.

As cápsulas porosas como emissor estão conectadas a uma tubulação plástica translúcida de diâmetro interno de 1,2 cm e está por sua vez ligada através de uma conexão a uma tubulação de alimentação de mesmo diâmetro. No interior da cápsula foi colocada uma bucha de parafuso nº 8, que funciona como filtro e como difusor (Figura 15).

Figura 18 – Detalhe do sistema de emissão de água utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema funcionou sob pressão constante, ou seja, a coluna de água que proporciona o fluxo de água que passa através das paredes das capsulas é constante, e para tanto foi lançado mão do princípio físico do “Frasco de Mariote” para alimentar o sistema (LIBARDI, 2012).

#### **4.2.4 Variáveis analisadas**

Aos 30 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram colhidas e foi medido os seus respectivos comprimentos e diâmetros com auxílio de fita métrica e paquímetro, após, as plantas foram lavadas e separadas em parte aérea e raiz. A massa fresca da parte aérea (MFPA) assim como a massa fresca da raiz (MFR) foram pesadas com balança de precisão de 0,01 g. Após a pesagem da matéria fresca da parte aérea, as plantas foram levadas para estufa de circulação forçada (65°C), onde permaneceram até atingir peso constante, pesando-se a massa seca da parte aérea das plantas.

#### **4.2.5 Análise estatística dos resultados**

Os dados do experimento, foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e posteriormente, conferindo sua normalidade, foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando significativos foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### **4.3 Resultados e Discussão**

A Tabela 6 apresenta a análise de variância (Teste F) para os diferentes manejos de irrigação utilizados. Observa-se que apenas a massa fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA) apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) em relação aos tratamentos estudados. A massa fresca (MFR) comprimento e diâmetro das raízes das plantas não foram influenciados pelos manejos da irrigação.

Trabalhos como os de Marques e Santos (2005) mostram que a cultura apresenta alta sensibilidade ao déficit hídrico, ocasionando perdas significativas no seu peso. Tal fato demonstra que os manejos da irrigação propostos neste trabalho, não influenciaram ou não provocaram déficit na cultura, já que a mesma apresentaria resposta acentuada. A pesquisa realizada por Almeida et al. (2018) corroboram com este resultado, já que os autores



demonstram que o encharcamento do solo também é algo danoso para cultura e que reduz a MFR da cultura.

Tabela 7 – Análise de variância para os parâmetros de produção e crescimento da cultura do rabanete

Fonte de variação	G. L.	MFPA	MFR	MSPA	Comp	Diam
Tratamentos	2	8,63*	24,00 <sup>ns</sup>	0,97**	14,23 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>
Resíduo	27	2,61	8,45	0,07	4,40	0,23
C.V. (%)		30,70	51,94	29,22	16,75	25,63

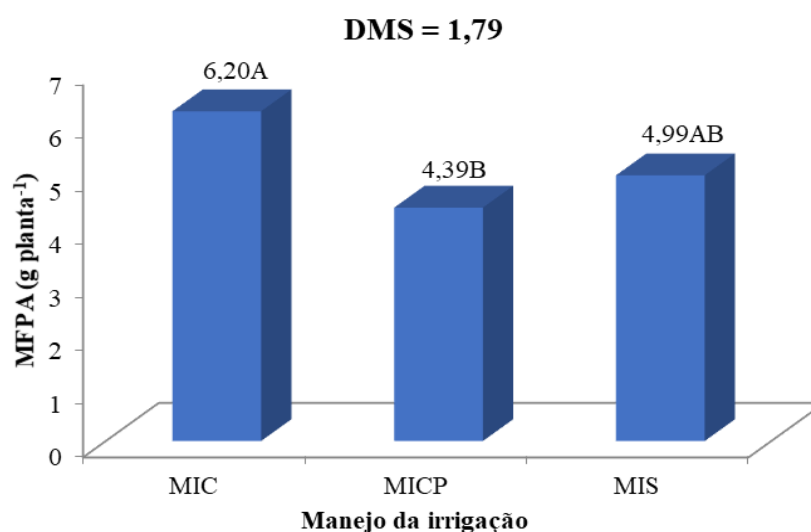
\*\* e \* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste F

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a variável MFPA (Figura 16), o fator MIC apresentou os maiores valores entre os tratamentos estudados de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), onde o MIC (6,20 g planta<sup>-1</sup>) apresentou valor médio superior ao MICP (4,39 g planta<sup>-1</sup>). Possivelmente, o excesso de umidade provocado pelo uso de cápsulas porosas, pode ter afetado esta variável.

Segundo Silva et al. (2005) em estudos com o uso de cápsulas porosas para irrigação, a porosidade livre de água deve estar acima de 20% para desenvolvimento ideal da cultura do meloeiro, atribuindo assim a redução na produtividade do meloeiro ao excesso de água, fato este que pode ser considerado para cultura do rabanete, conforme Almeida et al. (2018) em estudos sobre o excesso de água nesta cultura, que observaram redução na massa fresca da parte aérea devido a umidade elevada no solo.

Figura 19 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa fresca da parte aérea



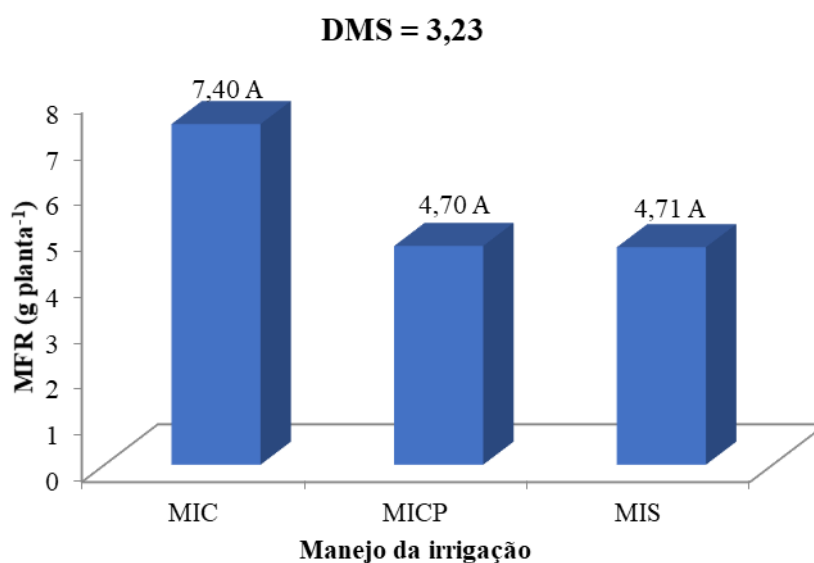
Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Evidencia-se que a variável-resposta MFR (Figura 17) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, portanto, embora o volume de água administrado nos três tratamentos tenham sido equivalentes, vale salientar que o MICP foi o que menos perdeu água por evaporação, tendo em vista que sua operação se deu abaixo da superfície do solo, fato que o credencia como uma opção interessante para o cultivo em termos de economia de água, principalmente na prática da agricultura em menor escala.

Algumas pesquisas evidenciam que o excesso de água pode causar redução no peso das raízes da cultura do rabanete, segundo Cunha et al. (2017), em estudos sobre a cultura do rabanete irrigada em diferentes épocas (inverno e verão) na região norte do sul-mato-grossense, a redução do peso da raiz pode ser ocasionada pelo excesso de água aplicada, onde lâminas de irrigação com 125% da ETC ocasionaram os menores valores para esta variável.

Figura 20 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa fresca da parte aérea

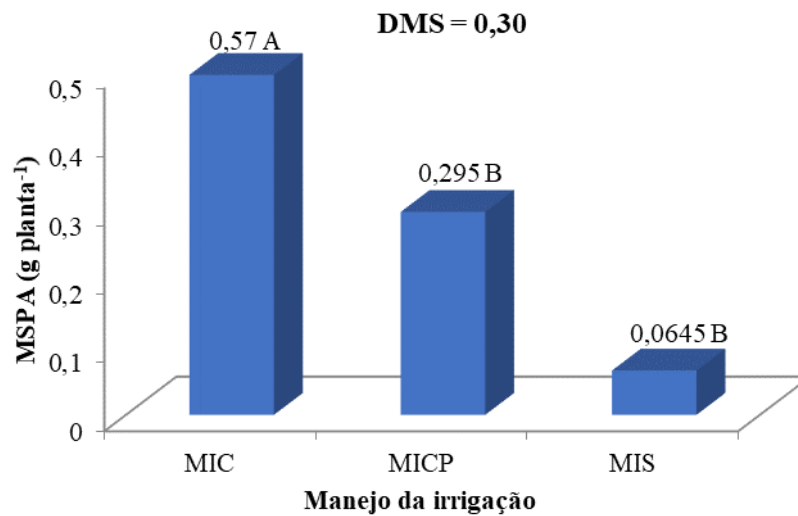


Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A variável resposta MSPA (Figura 18) apresentou para os fatores estudados efeito significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, em que o tratamento MIC apresentou os maiores valores dentre os demais tratamentos. A MSPA apresentou valores abaixo dos observados por Almeida et al., (2018), contudo as épocas de estudos diferem quanto ao clima, sendo o presente experimento realizado em épocas de maiores temperaturas.

Figura 21 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa seca da parte aérea



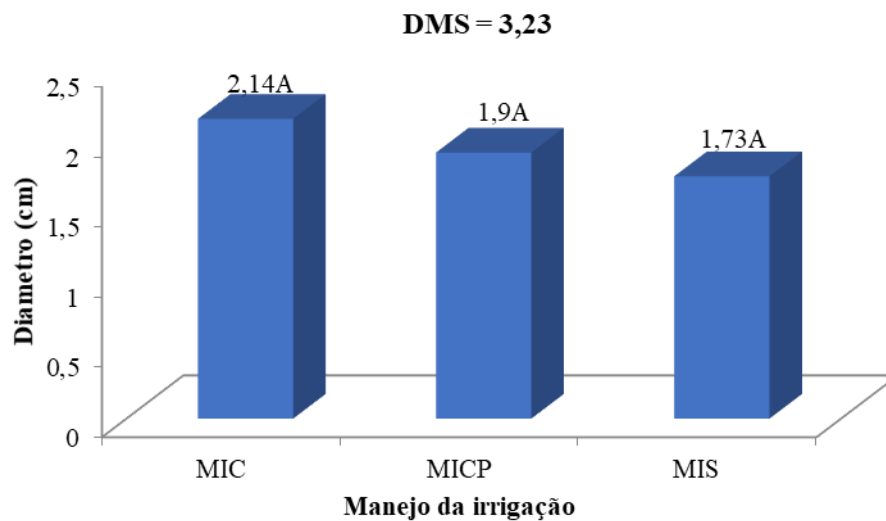
Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a variável diâmetro da raiz (Figura 19) não foram observadas diferenças entre os tratamentos estudados. O MIC apresentou diâmetro de 2,14 cm, enquanto o tratamento MICP obteve 1,90 cm de diâmetro. Os valores observados neste experimento ficaram próximos dos valores observados por Almeida et al. (2018) para a cultura do rabanete submetida um lençol freático constante de 5 cm de profundidade, tal fato evidencia o estresse sofrido pela cultura na época de plantio (novembro), devido as temperaturas da região.

Por outro lado, Lacerda et al. (2017) em estudos com a cultura do rabanete utilizando diferentes lâminas de irrigação em função da evapotranspiração da cultura, atribuíram o aumento do peso e diâmetro da raiz da cultura, ao aumento da disponibilidade de água, demonstrando a sensibilidade desta cultura ao déficit hídrico.

Figura 22 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável diâmetro da raiz aérea



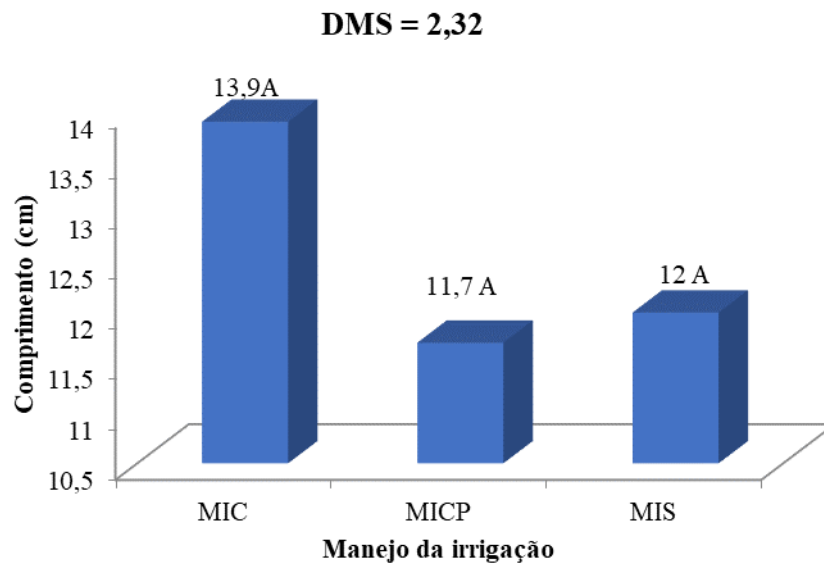
Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a variável comprimento das plantas (Figura 20), não foram observadas diferenças entre os tratamentos estudados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Tal fato, demonstra que o crescimento das plantas não foi afetado pelo MICP, pois apesar deste método aplicar água de maneira constante pelo processo de transudação dos seus emissores, quando há um equilíbrio entre as pressões no solo e no frasco de Mariotte, a transudação é interrompida, deixando o solo na umidade na capacidade de campo, onde após o processo de ETc atuar de maneira significativa, a transudação da cápsula irá começar novamente, disponibilizando água em pequenas quantidades.

Almeida et al. (2018) em estudos com a cultura do rabanete sob a influência de diferentes níveis de lençol freático abaixo da superfície do solo, observaram que o déficit hídrico (lençol freático a 30 cm da superfície) e o excesso de água (lençol freático a 5 cm da superfície) ocasionaram estresses similares nas plantas com relação a redução do crescimento, tais resultados evidenciam que o tratamento MICIP não causou um possível excesso de água, já que o resultado se assemelha aos demais manejos da irrigação.

Figura 23 – Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para a variável resposta massa fresca da parte aérea



Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Fonte: Elaborada pelo Autor.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante ao exposto, produto dos resultados encontrados e explicitados na presente TESE, concluo que o uso de sistemas de irrigação por cápsulas porosas apresenta-se como uma alternativa viável para o cultivo de hortaliças em pequenas áreas, por requerer menor volume de água quando comparado a sistemas do mesmo método, e exigindo pequenas cargas hidráulicas para o seu funcionamento, as quais podem ser viabilizadas por meio de pequenos reservatórios estrategicamente instalados.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ – ADECE. **Relatório de ocorrências – Janeiro/2017**. Disponível em: <http://www.adece.ce.gov.br/index.php/agronegocio/producao-agricola>. Acesso em: 1 jan. 2018.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO, irrigation and drainage paper**. Rome, 1998.
- ALMEIDA, A. C. S.; ALMEIDA, C. D. G. C.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Pressure compensating microsprinklers using microtube as a flow controller. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.36, n.1, p.36-45, 2016.
- ALMEIDA, A. V. R.; ARAGÃO, M. F.; SOUSA, H. G.; BEZERRA, F. M. S.; SILVA, A. O. Influência de níveis freáticos nos parâmetros produtivos e fisiológicos da cultura do rabanete. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 12, n. 5, p. 2907-2922, 2018.
- ANGELOTTI NETTO, A. **Estimativa da retenção de água no solo a partir do uso de equipamentos não convencionais: redes neurais artificiais e funções de pedotransferência**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 261. 2015. São Carlos, 2007.
- BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 Ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p
- BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 17-24, 2009.
- BURT, C. M.; STYLES, S. W. **Drip and microirrigation for trees, vines and row crops**. California: California Polytechnic State University, 1994, 261p.
- CUNHA, F. F.; CASTRO, M. A.; GODOY, A. R.; MAGALHÃES, F. F.; LEAL, A. J. F. Irrigação de cultivares de rabanete em diferentes épocas de cultivo no Nordeste Sul-Mato-Grossense. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n.3, p. 530-546, 2017.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campinas Grande: UFPB, 1994.306p.
- ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N. S. Wet bulbs from the subsurface drip irrigation with water supply and treated sewage effluent. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p. 242-253, 2015.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. 1. ed. Maringá: Eduem - Editora da Universidade Estadual de



Maringá, 2012. 356p.

FRIZZONE, J. A.; VIEIRA, A. T.; PAZ, V. P. S.; BOTREL, T. A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.

GRAH, V. de F. **Desenvolvimento de um sistema hidráulico-mecânico para o acionamento sequenciado da irrigação por aspersão em malha**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 67p, 2011.

GROVER, B.L.; LAMBORN, R.E. Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low solute concentrations. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.34, p.706-708, 1970.

JOHNSON, T. M.; CARTWRIGHT, K. **Monitoring of leachate migration in the unsaturated zone in the vicinity of sanitary landfills**. Illinois State: Illinois Institute of Natural Resources, 1980, 82p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkler and Trickle Irrigation**, New York: Avibook, 1990. 649p.

LACERDA, V. R.; GONÇALVES, B. G.; OLIVEIRA, F. G.; SOUSA, Y. B.; CASTRO, I. L. Características morfológicas e produtivas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 1, p. 1127-1134, 2017.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp; 2012. 352p.

LIMA, C. L. Além das águas, a discussão no Nordeste do Rio São Francisco. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, n.1, 94-100, 2005.

LIVINGSTON, B.E. Porous clay cones for the auto-irrigation of potted plants. **Plant World**, v. 21, n. 8, p 202–208, 1981.

LIZ, R. S. **Etapas para o planejamento e implantação de horta urbana**. Brasília: Embrapa, 2006, 12p. (Comunicado Técnico).

LUBANA, P.P. NARD, N.K ;LARRY,B.C. **Aplicação de um modelo hemisférico para prever raio de volume de solo molhado sob emissores de fontes pontuais para gotejadores irrigando tomates**.Irrigação Ciência,Punjab India,v.38,p.31–42,2011.

MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A; MEDEIROS, J. F. DE; DANTAS NETO, J. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, p.149-158, 2010.

MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A; MEDEIROS, J. F. DE; DANTAS NETO, J. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, p.149-158, 2010.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**.

3 ed. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.

MARQUE, P. A. A.; SANTOS, A. C. P. Efeito de diferentes níveis de irrigação baseadas em frações de tanque classe A sobre a produção de rabanete (*Raphanus Sativu L.*). **Colloquium Agrarie**, v. 1, n.2, 2005.

MELO JÚNIOR, J. C. F.; GERVÁSIO, E. S.; ARMINDO, R. A. Sistema de automação para o manejo da subirrigação em ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n.2, p. 337-350, 2013.

MONDAL, R.C. Farming whith a pitcher, a technique of water conservation. **World Crops**, v. 26, n. 2, p. 94 –97, 1974.

MORAES, N. B.; MEDEIROS, J. F.; LEVIEN, S. L. A.; OLIVEIRA, A. M. S. Avaliação de cápsulas de cerâmica e instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n.1, p. 58-63, 2006.

PRADO, G.; NUNES, L. H.; TINOS, A. C. Avaliação técnica de dois tipos de emissores empregados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n.1, p. 12-25, 2014.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera Conceitos, Processos e Aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004, 477p.

RICHARDS, L. A.; BLOOD, H. L. Some improvements in auto-irrigation apparatus. **Journal of Agricultural Research**, v. 49, p.115 – 21, 1939.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, v. 68, p. 95–112, 1949.

SCHEIDEGGER, A.E. **The physics of flow through porous media**. Toronto: University of Toronto Press, 1974, 372p.

SILVA, A. O.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J. Nitrate and potassium concentration in fertigated soil cultivated with wine vines. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n.3, p. 305-316, 2016.

SILVA, A. O.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J. Nitrate and potassium concentration in fertigated soil cultivated with wine vines. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 305-316, 2016.

SILVA, A. O.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J. Nitrate and potassium movement in a sandy loam soil cultivated with fertigated grapevine (*Vitisvinifera /L.*) in the Brazilian semiarid. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 40, p. 1-14, 2018.

SILVA, D. A.; SILVA, A. S.; GHEYI, H. R. **Irrigação por cápsulas porosas III: avaliação técnica do método por pressão hidrostática" na pequena irrigação para o trópico Semi-Árido: vazantes e cápsulas porosas**. Petrolina, PE, Brasil, EMBRAPA-CPATSA. 1981, p.20–42.

SILVA, E. F. F.; ANTI, G. R.; CARMELLO, Q. A. C.; DUARTE, S. N. Extratores de cápsulas porosas para o monitoramento da condutividade elétrica e do teor de potássio na solução de

um solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba v.57, n.4, p.785-789, 2000.

SILVA, T. J. A.; MACHADO, C. C.; BONFIM-SILVA, E. M.; COELHO, R. D. Influência do manejo da irrigação do meloeiro rendilhado cultivado em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n.3, p. 722-731, 2005.

SILVA, V. B. ; RABELO, J. S. ; COSTA, R. N. T. ; SILVA, A. O. ; ALMEIDA, A. V. R. . Response of the cherry tomato under organic cultivation to the production factors of water and ground cover. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, p. 214-220, 2019.

SNYDER, R. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, n. 6, p. 977-980, 1992.

SOCCOL, O. J.; CARARO, D. C.; SILVA, Ê. F. F.; ULLMANN, M. N. Condutância hidráulica e tempo de resposta de tensiômetros utilizados em cultivos fertirrigados. **Revista de Ciência Agroveterinárias**, Lages, v. 4, n.1, p. 3-10, 2005.

SOCCOL, O. J.; CARARO, D. C.; SILVA, Ê. F. F.; ULLMANN, M. N. Condutância hidráulica e tempo de resposta da tensiômetros usados em fertirrigação. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 4, n.1, p. 3-10, 2005.

SOUZA, W. de J.; BOTREL, T. A.; COELHO, R. D.; NOVA, N. A. V. Irrigação localizada subsuperficial: gotejador convencional e novo protótipo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 811-819, 2012.

TAVARES, A. C. S.; DUARTE, S. N.; DIAS, N. S.; MIRANDA, J. H.; ARRAES, F. D. D.; SOUSA NETO, O. N.; FERNANDES, C. S. Efeito da inundação do solo nos índices fisiológicos da cana-de-áçúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n.1, p. 229-235, 2018.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações**. Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017, 203p.

VIANA, L. B. F. **Entre o abstrato e o concreto**: Legados do embate sobre o projeto de integração do São Francisco ou da Transposição. 198 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Política) – Instituto de Ciência Política, Universidade de Brasília, Brasília. Brasília, 198 p, 2011.