

# WORKSHOP IBEROAMERICANO

**“Tecnologias de informação e comunicação (TIC) para a modernização dos sistemas de irrigação e valorização dos sistemas de irrigação ancestrais”**

*“Tecnologías de información y comunicación (TIC) para la modernización de los sistemas de riego y valoración de riegos ancestrales”*



Argentina  
Brasil  
Chile  
Paraguay  
Uruguay



**LOCAL: HOTEL MERCURE, Rod. Admar Gonzaga 600 - Itacorubi - Florianópolis - SC**

[www.aguas.sc.gov.br/cyted](http://www.aguas.sc.gov.br/cyted)

## TEMAS:

- I. Sistemas de apoio à tomada de decisão na gestão da irrigação às escalas do campo e do sistema;
- II. Necessidades de água e métodos de irrigação: modelagem, teledeteção, informação online e suas aplicações na extensão e assessoramento a regantes;
- III. Operação, gestão e análise de funcionamento de redes de irrigação pressurizada e por canais;
- IV. Modelos hidrológicos e de irrigação aplicados à gestão da água, à afectação e outorga de água, e na análise de impactos ambientais;
- V. Aspectos sociais e Tecnologias de Informação e Comunicação aplicados à melhoria e valorização de sistemas de irrigação ancestrais;
- VI. Tecnologias de Informação e Comunicação para a avaliação dos impactos de mudanças climáticas e de medidas de adaptação em agricultura irrigada, inclusivamente em sistemas de irrigação ancestrais.

Organização e apoio:



Secretaria de Estado  
do Desenvolvimento  
Econômico Sustentável



# MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM SENSORES DE CÁPSULA POROSA PERMEADOS POR AR – IRRIGAS<sup>®</sup>

Adonai Gimenez Calbo<sup>1</sup>, Henoque Ribeiro da Silva<sup>2</sup>, Waldir A. Marouelli<sup>2</sup>, Washington L.C. Silva<sup>3</sup>

## Resumo

Dentre as técnicas mais simples de manejo de irrigação, o sistema Irrigas<sup>®</sup> pode ser preparado com uma cápsula porosa (sensor) conectada por um tubo flexível a uma cuba transparente. Como fundamento tem-se que a passagem de ar pela cápsula porosa é obstruída quando a tensão de água no solo é menor que valor crítico e torna-se desobstruída quando a tensão da água no solo supera esse valor. Esta transição de obstruído/aberto nas cápsulas porosas é, então, utilizada para indicar o momento da irrigação. No sensor Irrigas a água ocupa apenas os vazios da cápsula porosa e por esta razão as leituras de tensão de água não requerem correção para pressão hidrostática nem a periódica adição de água, como é necessária em um tensiômetro comum. Dentre as principais qualidades do sistema destacam-se a: facilidade de uso; leitura confiável; e a possibilidade de acionamento pneumático, para registro e controle da tensão da água no solo. Para manejo de irrigação, os sensores são selecionados de acordo com a tensão crítica de água recomendada para a cultura. Atualmente, o Irrigas vem sendo utilizado para o manejo de irrigação de hortaliças, fruteiras e plantas ornamentais, tanto em sistemas manuais quanto automatizados. Além dos sensores Irrigas mais facilmente encontrados (12, 15, 25 e 40 kPa), sensores com outros valores também podem ser montados, bastando para isso adquirir-se cápsulas porosas com pressão de borbulhamento necessária, pressão de borbulhamento esta que é tomada como o módulo da tensão crítica do sensor Irrigas. O uso dos sensores Irrigas isoladamente e em conjuntos interconectados de diferentes maneiras são aqui abordados considerando-se as propriedades físicas que possibilitam definir o momento de irrigar e o ajuste dinâmico da lamina de irrigação durante o desenvolvimento dos cultivos.

**Palavras-chave:** cápsula porosa, lâmina de irrigação, sensor, tensão da água, tensiômetro.

## Irrigation scheduling with air permeated porous cup sensors – IRRIGAS<sup>®</sup>

### Summary

Among the simplest methods to schedule irrigation the Irrigas<sup>®</sup> system can be assembled with a simple porous cup (sensor), connected by a flexible tube to a transparent barrel to check soil water tension. The measuring basis is the porous cup air passage obstruction in moistened soil, which means soil water tension below a threshold value, and porous cup air passage opening as the soil dries. This transition between obstructed to opened air passage across the porous cup is then used as an indication of the irrigation moment. Since water occupies only empty volumes of the porous cup, then for the Irrigas system, there is no need of hydrostatic water level adjustment nor periodic water filling, as it is needed by the common tensiometer. Some of the main qualities of the Irrigas<sup>®</sup> are: it is easy to use, reliable and enables pneumatic actuation for data acquisition and automatic soil water tension control. For irrigation scheduling the sensors are selected according to the plant critical water tension. Presently, the Irrigas system is being used for irrigation scheduling of vegetable crops, fruits, ornamentals and grain crops. These applications are being pursued with commonly available Irrigas sensors with critical water tensions

<sup>1</sup> Ph.D., Embrapa Instrumentação, Caixa Postal 741, CEP 13570-970, São Carlos-SP, adonai@cnpdia.embrapa.br;

<sup>2</sup> Ph.D., Embrapa Hortaliças, C. Postal 218, 70359-970 Gama, DF, Brasil, henoque@cnpd.embrapa.br, waldir@cnpd.embrapa.br

<sup>3</sup> Ph.D., Embrapa Sede, Parque Estação Biológica s/nº, 70770-901 Brasília, DF, Brasil, washington.silva@embrapa.br.

Poster - CD-Rom

of 12, 15, 25 e 40 kPa. Besides these commonly available sensors, for specific uses, Irrigas sensors with other threshold values can be assembled using commercially available porous cups with required air bubbling pressure values. This bubbling pressure is taken as the modules of the Irrigas critical water tension. Individual and interconnected sensors are considered in this work, focusing into the physical properties that enable the definition of the irrigation moment and the fine adjustment of the irrigation depth during the crop growing season.

**Keywords:** porous cup, sensor, water depth, water tension, tensiometer

## **Introdução**

A adoção de métodos fundamentados em princípios físicos seguros para o manejo de irrigação vem aumentando lentamente. Esta vagarosa adoção de tecnologia, apesar de haver disponibilidade de boas técnicas baseadas em variáveis do clima, do solo e das plantas parece um paradoxo, tendo-se em vista a consciência que a sociedade tem tomado sobre os problemas da qualidade e da escassez da água no Brasil e no exterior. A falsa sensação de que a água é um recurso barato e abundante, e a incorreta percepção de que o manejo de irrigação é um procedimento caro, trabalhoso e irrelevante para a agroecologia e a produtividade dos cultivos tem feito com que muitos agricultores continuem perdendo recursos, mediante o uso ineficiente da água.

Dentre as boas técnicas de manejo de irrigação disponíveis está o sistema Irrigas (Calbo e Silva, 2001), que em uma concreção básica pode consistir apenas de uma cápsula porosa, que é o sensor, conectada a um dispositivo de pressurização de ar, com o qual se faz a leitura. Em solo úmido, os poros estão impregnados de água e há necessidade de pressão para forçar a passagem do ar através da cápsula porosa. Conforme o solo seca, a tensão de água aumenta e a pressão necessária para forçar a passagem de ar através da cápsula porosa é reduzida até zero. Assim, quando a tensão da água no solo se torna maior do que a pressão de borbulhamento ou valor crítico da cápsula porosa ( $T_d$ ), então, o ar permeia com facilidade os poros maiores. Em consequência pode-se determinar o momento da irrigação verificando-se que pressão de ar produzida pela imersão de uma cuba cheia de ar em água (Fig. 1) dissipa-se rapidamente na cápsula porosa, quando o solo está seco. Esta dissipação de pressão é observada como entrada de água na cuba transparente. Ao contrário, em solo úmido a pressão de ar não é dissipada e por consequência a água não entra na cuba cheia de ar, pelo método da imersão. Outra forma de utilizar o conceito é com o uso do leitor eletrônico portátil MPI-03, que contém um mini-compressor de ar. Quando este leitor portátil da tensão de água é acoplado ao tubo do sensor Irrigas no campo um led vermelho acende-se, caso o solo esteja seco, e um led verde acende-se quando a umidade do solo está em faixa adequada.

Neste trabalho o manejo de irrigação com o uso de sensores Irrigas é introduzido, enfatizando aspectos gerais e similaridades com outros sistemas, que também fazem uso de sensores pontuais, como o tensiômetro. A seguir, aspectos físicos cruciais para o funcionamento dos sensores Irrigas são apresentados, como um aprofundamento e o artigo é concluído com a descrição sistemas de interconexão de sensores Irrigas com os quais se procura melhorar a coleta e o uso de dados de tensão de água obtidos.

## **Aspectos básicos do manejo de irrigação com Irrigas**

Sabe-se que o manejo correto da água possibilita o suprimento adequado das necessidades hídricas das plantas, ao mesmo tempo em que evita a lixiviação profunda e

as restrições ao suprimento de oxigênio para as raízes. Para este fim as plantas devem ser corretamente irrigadas antes que a tensão da água no solo aumente a ponto de causar prejuízos ao desenvolvimento das plantas. A idéia é simples, porém para que o objetivo de irrigar adequadamente seja atingido, o agricultor requer parâmetros instrumentais bem definidos para estabelecer o momento, a lâmina e a taxa de irrigação.

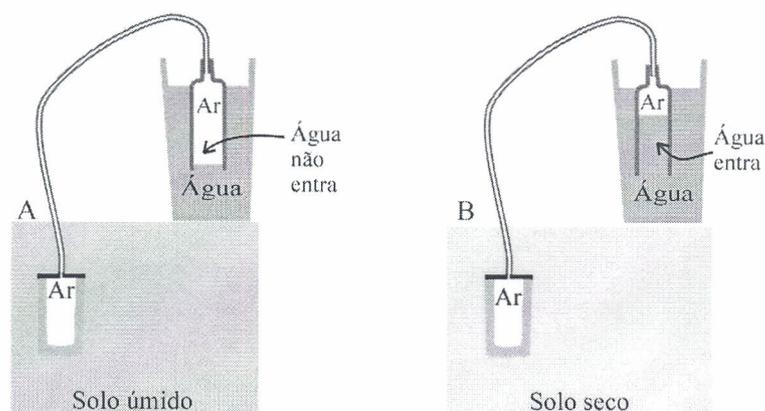


Fig. 1. Funcionamento ilustrativo do sensor Irrigas equipado com uma cuba de imersão transparente. À esquerda (A), em solo úmido, a imbibição da cápsula porosa com água impede a permeação do ar e também a entrada de água na cuba, conforme esta é imersa em água. À direita (B), em solo seco, há caminhos de poros abertos através dos quais o ar pode permear a cápsula porosa e, conseqüentemente, a água entra na cuba durante a imersão em água.

As questões “Quando irrigar?” e “Quanto irrigar?” certamente estão entre as primeiras a serem respondidas durante o manejo da irrigação. Para a questão “Quando irrigar?” uma resposta razoável é: Logo que a tensão da água no solo à metade da profundidade efetiva das raízes aumente a ponto de fazer com que a absorção de água torne-se inferior à reposição diária que evite perda de produtividade. Em outras palavras, a irrigação deve ser aplicada logo que a tensão da água no solo superar um valor crítico de tensão de água para a planta ( $T_c$ ).

A tensão crítica de água para as plantas ( $T_c$ ), por outro lado, trata-se de um valor experimental que depende das interações solo/planta/atmosfera. O valor de  $T_c$  é reduzido quando, por exemplo, há um aumento da evaporatividade, ou capacidade evaporativa do ar, em dias de vento, baixa umidade relativa e elevadas temperaturas. Como guia para manejo de irrigação, valores de  $T_c$  para diferentes estádios fenológicos das culturas são parâmetros valiosos, que aparecem com freqüência em manuais, para o microclimas e estações do ano específicas. Assim,  $T_c$  tende a ser mais ajustado quando aplicado aos mesmos solos, regiões e estações do ano nos quais os estudos básicos foram realizados.

A lâmina de irrigação correta (“Quanto irrigar?”), por outro lado, depende das características de retenção de água do solo, da profundidade das raízes, da distribuição espacial das raízes, da tensão da água na capacidade de campo e da tensão crítica de água para a planta ( $T_c$ ). Uma resposta simplificada a essa questão é irrigar com uma lâmina de água que aumente a umidade do solo de  $\theta_c$ , na tensão crítica  $T_c$ , para a umidade  $\theta_F$ , na tensão de água da capacidade de campo ( $T_{FC}$ ), em toda a profundidade efetiva do sistema radicular.

No esquema da figura 2 sensores Irrigas estão instalados em duas profundidades, similarmente ao recomendado para tensiômetros por Marouelli (2008) e para o Irrigas por Pozzani (2008). Os sensores instalados à metade da profundidade efetiva das raízes são os denominados “sensores raiz”. A irrigação deve ser aplicada assim que a tensão da água no solo superar  $T_c$ , por exemplo, em metade dos “sensores raiz” instalados para fazer o manejo de irrigação do cultivo. Os sensores instalados à profundidade maior são os denominados “sensores de iteração”, “sensores limite” ou “sensores de acompanhamento”. O procedimento de ajuste fino da lâmina de irrigação pode ser do seguinte tipo: Aumentar a lâmina de uma porcentagem fixa, por exemplo, de 20%, caso a maioria dos “sensores de iteração” estiverem secos quando for definido o momento da irrigação de acordo com a resposta dos “sensores raiz”. No caso inverso, quanto a maioria dos “sensores de iteração” estiverem úmidos, então, a irrigação é diminuída de um valor fixo, por exemplo, 15%. Nesse processo iterativo a lâmina de irrigação é dinamicamente acomodada às demandas da cultura, que podem variar no tempo. Os ajustes do método são muito simples e evitam perdas que ocorreriam com a aplicação de uma lâmina de irrigação fixa, que não considera a inteiração que ocorre entre consumo de água, profundidade, tipo de solo e desenvolvimento da cultura.

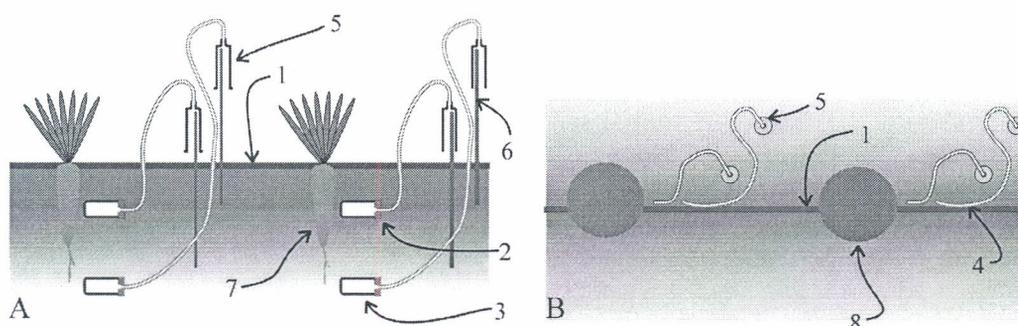


Fig. 2. Esquema com vistas lateral (A) e de topo (B) de sensores Irrigas instalados próximo a plantas irrigadas por gotejamento. Os sensores instalados à metade da profundidade efetiva das raízes “sensores raiz” definem quando irrigar e os sensores instalados à profundidade maior, “sensores iterativos” possibilitam o ajuste fino da lâmina de irrigação. 1- linha de gotejamento / emissores (pode não haver), 2- Irrigas, “sensor raiz”, 3- Irrigas, “sensor de iteração”, 4- tubo flexível do Irrigas, 5- cuba transparente (para teste de imersão), 6- haste, 7- sistema radicular, 8- planta.

Além da instalação adequada dos sensores com relação ao sistema radicular, o manejo de irrigação com sensores pontuais como o tensiômetro, o Irrigas ou o TDR (Time Domain Reflectometry) envolve, adicionalmente, a noção de variabilidade espacial da tensão da água no solo, que pode ser substancial dependendo do cultivo. Desse modo, para amostragem, um número suficiente de sensores deve ser instalado em posições que possibilitem a obtenção de medidas de tendência central, média, por exemplo, da tensão da água no solo. Para a amostragem adequada da umidade/tensão da água no solo a instalação correta de um número representativo de sensores é importante considerando-se que “A localização de estações de sensores no campo aparece como um primeiro problema no monitoramento do estado da água no solo, uma vez que o número de sensores disponíveis é normalmente pequeno em relação à área irrigada” (Coelho et al., 1995). Para os sensores Irrigas, que são de baixo custo e leitura fácil, como consequência, é simples instalar um o número necessário e adequado de sensores para atender à maioria das aplicações de manejo de irrigação. Adicionalmente, quando uma simples medida de tendência central, como a média, é o parâmetro utilizado para

manejo de irrigação, então diversos sensores Irrigas podem ser conectados a uma unidade central para leitura. Alternativamente, há também a possibilidade de que a leitura de sensores Irrigas seja acoplada a sistemas de leitura pontual de radiofrequência de baixo custo (RFID) (Calbo e Silva, 2005).

Para manejo de irrigação simples e de baixo custo, no campo, a leitura dos sensores pode ser feita pelo método de imersão (Fig. 1) ou com dispositivo eletrônico portátil (MPI-03). Ainda assim é importante que a leitura da tensão da água seja feita em pelo menos três grupos de sensores, como os ilustrados na figura 2, para se fazer um manejo de irrigação adequado.

Para várias hortaliças como: batata, tomate e cenoura, as cápsulas porosas devem ter tensão crítica entre 20 e 30 kPa. Para outras culturas, que toleram condições menos úmidas, devem ser empregadas cápsulas com tensões críticas maiores, que possibilitem aumentar o intervalo entre irrigações, o que é particularmente útil quando se empregam sistemas móveis de irrigação, cuja área total de irrigação é inversamente proporcional ao intervalo entre as regas.

Procedimentos diversos de manejo de irrigação com sensores Irrigas tem sido utilizados em diversos ensaios de manejo de irrigação no campo (Paschold e Mohammed (2003); Pereira *et al*, 2005; Viana, 2004; Santana, 2003) e em casa de vegetação e/ou com substratos agrícolas (Marouelli *et al*. 2005; Liz *et al*, 2007). Adicionalmente, estes fundamentos vem sendo utilizados por agricultores no Brasil e no exterior, que fazem uso de sensores Irrigas em associação com sistemas manuais e eletrônicos de leitura e de aquisição de periódica de dados com e sem automatização da irrigação.

### **Parâmetros físicos em sensores Irrigas**

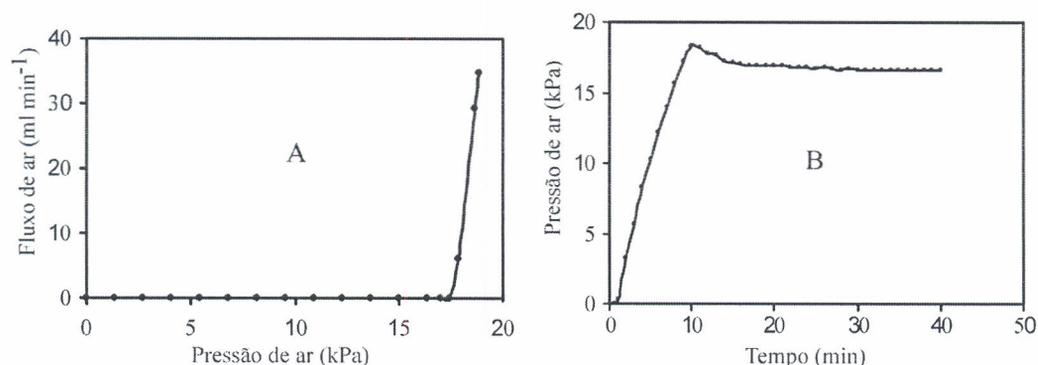
Para entender o funcionamento do sistema Irrigas deve-se considerar que conforme a tensão da água aumenta, também aumenta a ocorrência de poros preenchidos por ar, enquanto que a água coalescente permanece nos poros menores. Assim, enquanto o solo seca, progressivamente, são formados meandros preenchidos por ar no interior da cápsula porosa, que se tornam tanto maiores e mais desobstruídos pela água quanto mais aumenta a tensão da água no solo. Conseqüentemente, em solo suficientemente seco, o ar permeia a cápsula porosa com facilidade e quando a tensão da água no solo supera a denominada tensão crítica do sensor ( $T_d$ ), então, no teste de imersão (Fig. 1-A), para o sensor Irrigas, ocorre a entrada de água na cuba transparente, até que a altura do menisco ar-água iguala-se com a altura da água no frasco. A tensão crítica de secamento ou dessorção ( $T_d$ ) é em módulo igual à pressão de início de borbulhamento conforme se pode observar na figura 3A.

A tensão de água ( $T$ ) com sensores Irrigas pode ser obtida com as expressões:  $T=T_d-p$  e  $T=T_s-p$ , onde  $T_d$  é a tensão crítica de dessorção da água (início de borbulhamento),  $T_s$  é a tensão crítica de sorção (fim de borbulhamento) e  $p$  é a pressão gasosa (Calbo e Silva, 2006). Estas equações idealmente são válidas na condição de fluxo “nulo” durante a secagem (dessorção) ou na umidificação (sorção). Estes valores críticos ( $T_d$  e  $T_s$ ) são tanto maiores quanto menores sejam os diâmetros efetivos dos poros deste sensor.

### ***Fluxo de ar e pressão***

Quando se aumentou a pressão ( $p$ ) de ar aplicada em cápsula porosas imersas, e previamente impregnadas, em água, o borbulhamento foi iniciado em pressão ( $p$ )

superou ligeiramente maior que  $T_d$  (Figura 3A) e ao se diminuir a pressão no sistema o borbulhamento diminui até cessar na pressão  $T_s$ , uma pressão menor que  $T_d$ .



**Fig. 3.** A) Pressão induzida por um fluxo de ar estacionário de  $1,8 \text{ ml min}^{-1}$  em uma cápsula porosa Hidrosense imersa em água. B) Relação típica entre a pressão de ar aplicada e o fluxo de ar que atravessa a mesma cápsula porosa imersa em água.

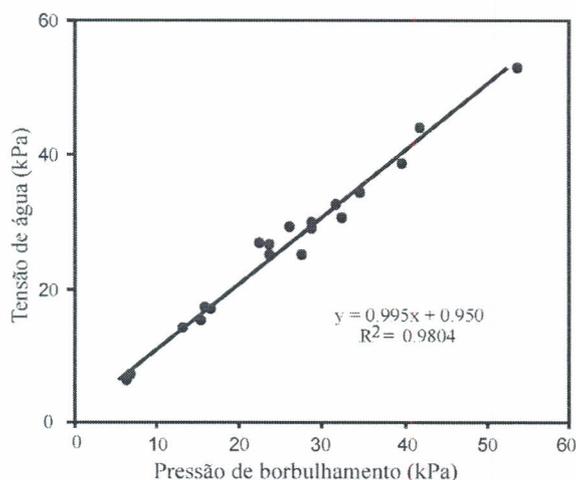
Na figura 3B, diferentemente, ilustra-se um traço típico de pressão induzida por um fluxo estacionário de ar. Neste traço o valor máximo de pressão representa a estimativa de  $T_d$  e o valor estabilizado da pressão é a estimativa de  $T_s$  (Calbo e Silva, 2006).

A leitura da tensão crítica de desorção ( $T_d$ ) dos sensores Irrigas tem sido importante para as medições efetuadas pelo método da imersão (Fig. 1) e com o uso de instrumentos portáteis de leitura como o MPI-03. A leitura da tensão crítica de sorção ( $T_s$ ) por outro lado tem sido importante em instrumentos eletrônicos que mantêm os sensores Irrigas pressurizados continuamente pela passagem de um fluxo de ar ajustado. Estes sistemas eletrônicos possibilitam aquisição periódica de dados da tensão da água no solo e aplicações de controle automatizado da irrigação mediante o emprego de instrumentos como o MRI-D e o MDI da Hidrosense (Pozzani, 2008).

#### **Permeabilidade ao ar e tensão crítica**

Na figura 4 observa-se uma reta com declividade próxima da unidade relacionando os valores de  $T_d$  de uma variedade de sensores Irrigas ensaiados e a tensão de água no solo necessária para torná-los permeáveis ao ar. Esse resultado é uma evidência da validade do método da imersão da cuba transparente para determinar quando a tensão da água no solo supera  $T_d$ .

As evidências anteriores, diferentemente da figura 4, foram obtidas em trabalhos de campo, menos precisos, nos quais a comparação entre o Irrigas e outros sensores, são importantes como validações científicas de campo para o sistema Irrigas. Aqueles experimentos de campo, no entanto, não possibilitam evidenciar com rigor a tensão da água no solo em que o sensor Irrigas se torna permeável ao ar. Os resultados ilustrados na figura 4, diferentemente, foram realizados metodologia específica que possibilita exato ajuste da tensão da água no solo amostrado pelo sensor Irrigas mediante o emprego de câmara de Richards de pressão negativa (Calbo e Silva, 2006; Richards, 1949).

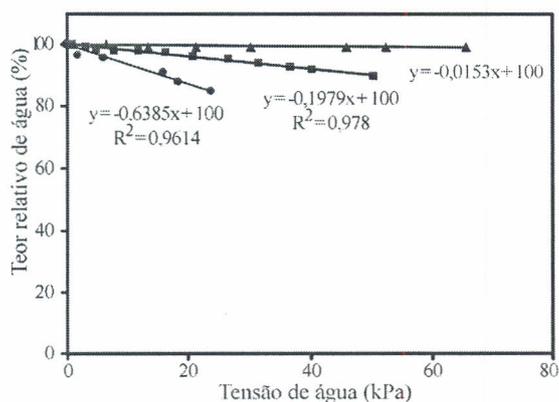


**Fig. 4.** Tensão da água no solo na qual sensores Irrigas com diferentes pressões de início de borbulhamento (Td) tornam-se permeáveis ao ar.

#### *Massa da cápsula porosa versus tensão da água*

Para que sensores tenham resposta rápida, a troca de água entre a cápsula porosa e o substrato é uma variável determinante, pois quanto maior for a quantidade de água trocada em uma medição, do mesmo tipo, maior será o tempo de resposta.

Cada cápsula porosa possui uma curva característica do seu teor relativo de água como função da tensão de água no solo. Assim, a perda de água de cápsulas porosas durante a secagem foi aferida entre zero e tensões de água ao redor das tensões críticas de dessorção (Td), de cada cápsula. Observa-se na figura 5 que o teor relativo de água das cápsulas porosas diminuiu linearmente com o aumento da tensão da água, dentro de faixas nas quais cada uma das cápsulas porosas ainda se mantém impermeáveis à passagem do ar. Adicionalmente, observa-se que as cápsulas porosas de Td mais elevado, com poros mais finos, trocaram menos água. Considerando-se que um sensor ideal seria aquele que medisse as variações da tensão da água sem trocar água com o solo, então, esta característica das cápsulas porosas Irrigas de maior Td perderem menos água é uma qualidade favorável, tendo-se em vista que a condutividade hidráulica do solo decresce rapidamente com o aumento da tensão da água.



**Fig. 5.** Teor relativo de água de cápsulas porosas com três diferentes tensões críticas de dessorção (Td) em função da tensão de água. ▲ - 120 kPa ■ - 27,5 kPa ● - 15,4 kPa

## Estações de controle de irrigação

Uma estação de controle de irrigação é uma amostra de umidade ou tensão de água no solo tomada por um conjunto de sensores pontuais como o Irrigas, o tensiômetro, ou o bloco de gesso, por exemplo, que são espacialmente distribuídos no solo sob cultivo, para monitoramento e manejo de irrigação. Conforme considerado anteriormente, isto é necessário porque a absorção da água pelas raízes gera padrões de distribuição tridimensional da tensão de água no solo, que são funções da espécie, desenvolvimento radicular e outras variáveis. O que se espera de uma estação de controle de irrigação, portanto, é uma medida de tendência central para a tensão da água no solo que subsidie nas tarefas de determinar quando irrigar e no ajuste fino da lâmina de irrigação.

O sistema Irrigas, em geral, depende de leituras de pressão com as quais se estima a tensão da água no solo. Consequentemente, a aquisição de valores de tensão de água mediante transdutores de pressão e coletores de dados é uma forma prática e atual de utilizar este sistema. Caso os sensores de tensão de água da estação de controle de irrigação sejam todos independentes, então, o tratamento a ser dispensado pode ser o preparo de uma grade de sensores (Calbo e Silva, 2005; Calbo, 2006). Por outro lado, caso os sensores estejam de alguma forma conectados entre si, por exemplo, em conexão paralela (Hidrosense, 2006) ou em conexão medial, como será descrito adiante, então a resposta sinérgica dos sensores interconectados, ao invés de independentes, deve ser compreendida.

### Grade de sensores

Uma grade de sensores pode ser produzida empregando-se noções de “gas flowboard” (Calbo, 1989) e de tensiometria a gás. Por exemplo, uma grade de 12 sensores Irrigas, com tensão crítica de sorção ( $T_s$ ) de 25kPa, seriam pressurizados com um fluxo forçado de ar – e.g.  $10 \text{ ml min}^{-1}$  – como no sistema ilustrado na figura 6. Numa grade como esta, a pressão ( $p_i$ ) do ar no interior de um sensor Irrigas é uma medida da tensão de água ( $T_i$ ), a que este sensor é submetido no solo (Calbo e Silva, 2006), de acordo com a equação da tensiometria a gás:

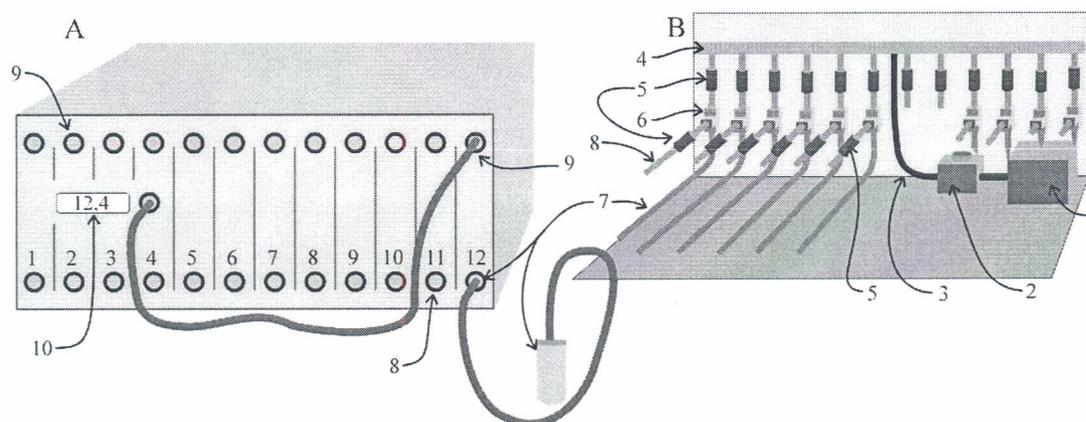


Fig. 6. Grade de sensores Irrigas para leitura individualizada da tensão de água em 12 saídas. A- Esquema do instrumento com 12 conexões de leitura da tensão de água de água no topo, correspondente a 12 sensores Irrigas conectados na base. A leitura da tensão de água é feita no transdutor de pressão. B- Esquema do compressor, regulador de pressão de entrada e bifurcações ligadas aos sensores Irrigas de um lado e a restrições de entrada e de leitura nos outros dois lados. 1- Mini compressor de ar, 2- regulador de pressão, 3 e 4- tubos com pressão de ar regulada, 5- restrições para ajuste da vazão de ar, 6- bifurcação, 7- tubo para a condução de fluxo de ar para o sensor Irrigas, 8- tubo interno para a condução do ar de acordo com a pressurização no sensor Irrigas, 9- tubo externo para ligação de cada sensor Irrigas ao transdutor de pressão com o qual se mede a tensão da água (10).

$$T_i = T_{s_i} - p_i \quad (1)$$

onde  $T_i$  é a tensão da água no solo na região  $i$ ,  $T_{s_i}$  é a tensão crítica de sorção do Irrigas  $i$  e  $p_i$  é a pressão de ar de “equilíbrio dinâmico” no referido sensor, medida com relação à pressão barométrica. A leitura da pressão gasosa ( $p_i$ ) é feita em transdutor pressão e a conexão para leitura é feita com auxílio de do acoplamento de um tubo flexível (9).

A grade de sensores (Fig. 6) possibilita o acompanhamento da tensão da água em diversos pontos de uma estação de controle. É interessante salientar-se que não só tensão de água, mas também pressões positivas de água são mensuráveis com sensores Irrigas, aspecto que é relevante em áreas sujeitas ao afloramento de água.

Em grades como a da figura 6 é importante que a pressão de ar regulada (3, 4) seja preferencialmente mais de quatro vezes maior do que a tensão crítica de sorção dos sensores Irrigas ( $T_s$ ). Esta magnitude da pressão de ar, de acordo com a equação de Poiseuille modificada para gases (Moore, 1972), assegura um fluxo de gás estável através das cápsulas porosas, com variações sempre menores que 30%. O ajuste do fluxo de ar através dos sensores Irrigas, por outro lado, é efetuado mediante o uso de restrições (5). Estas restrições, em geral, são duráveis e raramente entopem, especialmente quando o compressor de ar (1) seja equipado um filtro de ar.

Em resumo uma grade de sensores Irrigas (Fig. 6) é um instrumento que possibilita a leitura da tensão ou pressão da água em cada região monitorada do perfil do solo, para aplicações em manejo de irrigação e geofísica. Para manejo de irrigação, por exemplo, um grupo de seis “sensores raiz” poderia ser utilizado para definir quando irrigar e outro grupo de seis sensores possibilitaria o ajuste fino da lâmina de irrigação, com o procedimento dos “sensores de iteração”.

### ***Estação de controle medial***

Na descrição desta estação de controle de irrigação medial e também na estação de controle com sensores em paralelo considera-se que os sensores Irrigas utilizados sejam idênticos e que possuam uma tensão crítica de trabalho de valor  $T_s$ .

No sistema medial em um transdutor de pressão lê-se a tensão de água média de um grupo de sensores Irrigas graças à forma específica como estes sensores são conectados à fonte de um lado e ao transdutor de pressão do outro. No sistema descrito por Calbo (2006) um tubo conduz a pressão de ar regulada até os sensores Irrigas no campo. As restrições utilizadas são similares aquelas ilustradas na figura 6, enquanto que um tubo de retorno integra a respostas de cada sensor Irrigas e devolve ao transdutor de pressão uma resposta média (medial). Uma estação de irrigação medial de seis sensores pode, por exemplo, ser improvisada conectando-se as seis primeiras saídas (9) (Fig. 6), em um único tubo que ao ser acoplado no transdutor de pressão (10) produz uma estimativa medial, aproximadamente a média da pressão ( $p_m$ ) e que é dada pela expressão:

$$p_m = (p_1 + p_2 \dots + p_n) / n = \sum_{i=1}^{i=n} (p_i / n) \quad (2)$$

Onde  $p_1, p_2, \dots$  e  $p_n$  são as pressões de ar em cada sensor e  $p_i$  é a pressão no sensor Irrigas  $i$ . Caso todos os sensores estejam submetidos a tensões de água menores que  $T_s$ , então, a tensão da água média ( $T_m$ ) lida com o transdutor de pressão é:

$$T_m = T_s - p_m \quad (3)$$

A estimativa da tensão da água do solo obtida em estação de controle de irrigação medial envolve pequenas restrições, a saber:

1- O ar é compressível e, por isto, de acordo com a equação de Poiseuille modificada para gases (Moore, 1972), possibilita mais entrada de ar dos sensores Irrigas em solo úmido (pressão maior), o que faz com a estimativa de  $T_m$  com a equação 3 seja ligeiramente subestimada.

2- Quando a tensão da água em um ou mais sensores Irrigas supera  $T_s$ , qualquer subsequente aumento da tensão da água no solo ao redor deste sensor deixa de ser detectada. Esta é outra causa de subestimativa da tensão de água media do solo ( $T_m$ ) em estação de controle de irrigação medial.

Para o primeiro tipo de erro, pode-se desenvolver uma equação mais exata, e mais complexa, fazendo-se uso da equação de Poiseuille modificada para gases (Moore, 1972). O benefício deste aumento de complexidade, no entanto, parece ser diminuto para aplicações de manejo de irrigação, as quais envolvem grandes variações espaciais da tensão da água no solo. Sobre o erro do tipo dois a solução é mais simples e envolve instalar adequadamente os sensores Irrigas e ajustar o “setpoint” em valor abaixo de 70% de  $T_s$ , para que a probabilidade da ocorrência de sensores em solo sob tensão maior que  $T_s$  seja estatisticamente pequena.

#### ***Estação com sensores em paralelo***

Caso hajam seis sensores Irrigas conectados em paralelo submetidos a um fluxo forçado de  $10 \text{ ml min}^{-1}$  por sensor (Calbo, 2006), então o fluxo total aplicado pelo instrumento deve estar ajustado em uma restrição que controle  $60 \text{ ml min}^{-1}$ , a partir de um tubo com pressão de ar ajustada. Uma estação de controle de irrigação com sensores em paralelo contém um compressor ar/regulador de pressão, uma restrição, tubos bifurcações e um transdutor de pressão. O fluxo forçado de ar através de cada sensor Irrigas, neste caso, depende não só da tensão da água na região do solo amostrada, mas também da tensão da água nas regiões que são amostradas por cada um dos demais sensores Irrigas ligados em paralelo.

A leitura dos sensores Irrigas em um sistema paralelo é uma medida de tendência central, que superestima a tensão de água média do solo. Em outras palavras a leitura, no sistema paralelo de conexão de sensores Irrigas, se aproxima mais da leitura dos sensores nas regiões mais secas do solo amostrado (Calbo, 2006). Adicionalmente, este é um efeito modulado pelo fluxo de ar médio aplicado aos sensores conectados em paralelo. A superestimativa da tensão da água média neste sistema pode ser aliviada aumentando-se o fluxo de ar total, dentro de certo limite que depende das características dos sensores utilizados. Apesar das limitações conceituais das estações de controle de irrigação com sensores Irrigas ligados em paralelo estas vem sendo utilizadas com sucesso. De um lado pela questão de praticidade e de outro porque os sistemas comerciais que fazem uso da ligação paralela não funcionam exatamente com o procedimento básico aqui descrito.

#### ***Comparações práticas adicionais***

Os sistemas em grade possibilitam a avaliação da variabilidade espacial da tensão de água, que pode ser útil para aplicação do conceito de agricultura de precisão ou para monitoramento ambiental. A limitação prática das grades é no que tange à distribuição

de tubos no campo, visto que de cada região de solo amostrada deve receber um tubo de sensor Irrigas, que é conduzido individualmente até a central (Fig. 6).

Caso uma estação de controle medial seja improvisada fazendo-se uso do aparelho ilustrado na figura 6, então se obtém valores médios para os sensores Irrigas interligados. As demais limitações são idênticas às descritas para a grade no parágrafo anterior. Diferentemente, caso o sistema medial seja utilizado com a montagem descrita por Calbo (2006), então dois tubos serão utilizados, um para levar ar sob pressão ajustada e outro para trazer o ar que integra todos os sensores Irrigas no campo, através do valor medial de pressão. Neste caso, estes dois tubos devem ser conduzidos em paralelo através de todas as regiões do solo amostradas.

A estação de manejo de irrigação com sensores Irrigas conectados em paralelo requer que apenas um tubo seja conduzido para os pontos amostrais no campo. Trata-se de um sistema mais simples de implementar, no entanto, como explicado anteriormente é um sistema que superestima a tensão da água média no solo e que é mais susceptível a danos localizados nos sensores. Do lado favorável é um sistema que evita que algumas plantas sejam submetidas a tensões de água maiores que  $T_s$ , o que pode ocorrer quando se faz uso outros sistemas como as grades e o sistema medial de interligação para sensores Irrigas.

### **Sensores disponíveis e inovações previstas**

As propriedades físicas dos sensores Irrigas facilitam, instalações individualizadas e interconectadas de sensores. Neste trabalho, enfatizou-se a parametrização básica do uso dos sensores Irrigas, com o intuito de facilitar a aquisição de dados para definir o momento correto de irrigar e também para ajustar a lamina de irrigação durante o desenvolvimento dos cultivos. Sob o ponto de vista de definir o início da irrigação, espera-se também que os sensores Irrigas facilitem o acionamento pneumático e localizado de novos gotejadores “a prova de entupimento” (Calbo, 2008), que possibilitam a quantificação e localização da água, além de possibilitar vazões muito menores do que se consegue com outros gotejadores. Esta flexibilidade, dentre facilitará a rega de solos e substratos; desde os extremamente permeáveis, como certos solos arenosos; até aqueles de baixa permeabilidade, como certos solos argilosos muito sujeitos ao escorrimento superficial.

### **Bibliografia**

- Calbo, A.G., 2004. Gas irrigation control system based on soil moisture determination through porous capsules. US Patent 6705542B2.
- Calbo, A.G., 2006. Grades, monitoramento de água e estações de controle de irrigação como sensores Irrigas. São Carlos, 4p. (Comunicado Técnico 73).
- Calbo, A.G., 2008. Sistema de gotejamento para irrigação e arejamento caracterizado por ter a vazão de água ajustada por fluxo de ar. Depósito de Pedido de Patente, INPI, Brasil, 11/09/2008.
- Calbo, A.G., Silva, W.L.C., 2001. Irrigas – novo sistema para o controle da irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., Fortaleza, 2001. Anais... Brasília: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. 2001. pp. 177-182.
- Calbo, A.G., Silva, W.L.C., 2005. Sistema Irrigas para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos. Brasília: Embrapa Hortaliças. 174 pp.
- Calbo, A.G., Silva, W.L.C., 2006. Gaseous irrigation control system: Description and physical

- tests for performance assessment. *Bragantia*. 65: 501-510, 2006.
- Coelho, E.F., Souza, V.A.B., Conceição, M.A.F., 1996. Comportamento da cultura da cebola em três regimes de irrigação e cinco espaçamentos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 31: 585-591.
- Liz, R.S.de, Calbo, A.G., Carrijo, O.A., 2007. Uso do sensor Irrigas<sup>®</sup> para determinar a curva de retenção de água em substratos hortícolas. Comunicado Técnico 49, Embrapa Hortaliças, Brasília, Brasil. 6 pp.
- Marouelli, W.A., 2008. Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças. Circular técnica 57, Embrapa Hortaliças, Brasília, Brasil, 15 pp.
- Marouelli, W.A., Calbo, A.G., Carrijo, O.A., 2005. Avaliação de sensores tipo Irrigas<sup>®</sup> para o controle da irrigação em hortaliças cultivadas em substrato. *Irriga*. 10: 88-95.
- Marouelli, W.A., Silva, H.R. da, Silva, W.L.C., 1996. (5.ed.) Manejo da Irrigação em Hortaliças. Embrapa SPI, Brasília, Brasil. 72 pp.
- Moore, W.J., 1972. (4. ed) Physical chemistry. Prentice-Hall, New Jersey, Estados Unidos. 977 pp.
- Paschold, P.J., Mohammed, A., 2003. Irrigas<sup>®</sup> - a new simple soil moisture sensor for irrigation scheduling. *Journal of Applied and Irrigation Science*. 38: 22-28.
- Pereira, A.B., Shock, C.A., Shock, C.C., Feibert, E.B.G., 2005. Use of Irrigas<sup>®</sup> for irrigation scheduling for onion under furrow irrigation. Agricultural Experiment Station, Oregon State University. pp.223-229. (Special Report 1062).
- Pozzani, E.R., 2008. Produtos. Disponível em: <http://www.hidrosense.com.br/PROD.HTM>. Acesso em: 10 set. 2008.
- Richards, L.A., 1949 Methods of mounting porous plates used in soil moisture measurements. *Agronomy Journal*. 41: 489-490.
- Santana, M.S., 2003. Crescimento inicial de duas cultivares de cafeeiro adensado influenciado por níveis de irrigação localizada. Tese mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. 50 pp.
- Viana, J.L.B., 2004 Manejo da irrigação por gotejamento durante o segundo ano de cultivo do cafeeiro adensado. Tese de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. 44 pp.