



II WORKSHOP DE APLICAÇÕES DE TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL



REDES DE SENSORES SEM FIO PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Prof. Dr. Ladislau Marcelino Rabello

ANDRÉ TORRE-NETO¹, LADISLAU M. RABELLO¹

Laboratório de Eletrônica e Desenvolvimento, CNPDIA, EMBRAPA¹
Caixa postal 741, 13560-970 São Carlos, SP, BRASIL.

E-mails: andré@cnpdia.embrapa.br, rabello@cnpdia.embrapa.br

Resumo

A produção de frutas no Brasil era em torno de 38 milhões de toneladas em 2002, ocupando a 30ª posição mundial. Atrás da China com 133 milhões e Índia com 59 milhões de toneladas (FAO Statistical, 2002). A produção de citros foi a mais importante contribuição para esta posição (49%) e o suco de laranja sozinho representa 1,87% do total das exportações brasileiras naquele ano. Apesar disto, mais da totalidade da área de plantação de laranja (820 mil hectares) ainda não são irrigadas. Este cenário está mudando. Devido à necessidade do controle de doenças, principalmente a morte súbita, o sistema de irrigação instalado expandiu de 1,5% em 1999 para 10,2% em 2004 no total da área de citros. Entretanto, a conservação de mananciais de água demanda que métodos devem ser desenvolvidos para maximizar o uso eficiente de água irrigada. Neste artigo, é mostrado o desenvolvimento de uma instrumentação fixa sem fio (rede de sensores e atuadores) e suas respectivas ferramentas de programas computacionais para irrigação de culturas perenes de maneira espacialmente diferenciada.

Introdução

A água, essencial à existência e bem estar do homem e à manutenção dos ecossistemas do planeta, passou a ser um recurso natural de valor econômico, estratégico e social. Embora a Terra tenha água em abundância, a porcentagem de água doce acessível é baixa. Do volume total de água existente no planeta, 97% está nos oceanos e mares e, portanto, é inadequada para o consumo direto por ser salgada. Do restante, 2% estão armazenadas nas geleiras, em lugares quase inacessíveis, e apenas 1% está disponível para uso direto, armazenado em lençóis subterrâneos, lagos, rios e na atmosfera. O Brasil detém 11,6% dessa água doce superficial, sendo que 70% estão localizadas na Região Amazônica. Os 30% restantes distribuí-se desigualmente pelo país, para atender 93% da população.

A Figura 1 mostra que a agricultura é responsável por cerca de 70% do consumo mundial da água doce, seguida pela indústria, em torno de 23%, e pelo uso doméstico,

7%. Essa distribuição varia de um continente para outro, entretanto, o consumo agrícola sempre se sobressai, com no mínimo 50% do consumo, inclusive na América do Sul.

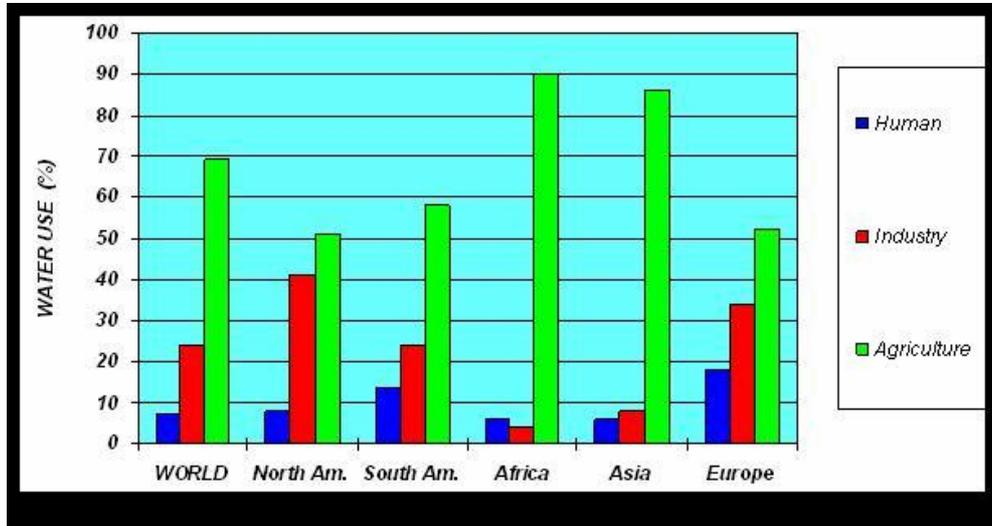


Figura 1: derivação de água doce por setor no mundo

Mesmo assim, dados de 1994 do DNEI mostram que o Brasil irriga apenas 2.208.690 hectares de uma área plantada de 54.961.850 hectares. São apenas 4% do total de área plantada (a média mundial é de 18%), o que demonstra que a irrigação no país tem um imenso potencial de crescimento e conseqüente significativo incremento de produção e consumo de água a serem explorados. Uma vez que, mantida a prioridade das políticas agrícolas de aumento de produtividade, redução de custos de produção e melhoria na qualidade do produto final, a tecnologia de irrigação deve tornar-se peça fundamental para o crescimento da agricultura nacional. Ao mesmo tempo, o uso racional de água já é um tema estratégico no país.

O governo federal tem adotado medidas para conter desperdícios e incentivar o uso racional da água através da Lei no. 9.433, de 08 de janeiro de 1997, onde institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal e altera o artigo 1º. Da Lei no. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Um ponto que se destaca nessa lei é a cobrança pela outorga de recursos hídricos para as áreas rurais. Esse novo panorama torna imprescindível o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a racionalização do uso de água em sistemas irrigados que visem à redução de gastos e, ao mesmo tempo, melhorem o processo visando aumento de produtividade com competitividade no mercado internacional.

Sabe-se que os recursos mais avançados da eletrônica e computação, como os sistemas de posicionamento global (GPS), os sistemas de informação geográfica (SIG ou GIS), os sistemas de controle e aquisição de dados, sensores e atuadores, entre outros, estão

cada vez mais presentes no campo através da agricultura de precisão. Essa evolução pode ser acompanhada em extensa lista de literatura, entre as quais se ressaltam Schueller (1992); Auernhammer (1994); Balastriere (1994); Robert et al. (1995); Robert et al. (1996); Stafford (1996); Molin (1997), Nielsen et al. (1996); e Schueller (1997).

Não obstante toda essa sustentação tecnológica há muito pouco desenvolvimento para o manejo sítio-específico de culturas perenes, como a cafeicultura e fruticultura. O mesmo pode-se afirmar com relação à irrigação e fertirrigação. Diferentes estratégias convencionais têm sido estudadas para minimizar as perdas da irrigação e aumentar os lucros. Entretanto, as que consideram a variabilidade espacial das culturas e das propriedades do solo são relativamente recentes. Um sistema de controle em tempo real foi implementado por Wall et al. (1996). Nesse trabalho unidades processadoras inteligentes foram interligadas em rede utilizando a própria rede de alimentação dos motores do pivô como meio de comunicação. Sadler et al. (1997) descreve um sistema desenvolvido pelo USDA-ARS para a aplicação espacialmente variável de água por pivô central como a chave para corrigir a variabilidade da produtividade na região costeira do sudeste norte-americano. Um trabalho que alia os conceitos do manejo sítio-específico em irrigação localizada para culturas perenes foi realizado por Torre-Neto et al. (2001) em programa de pós-doutorado pela FAPESP, proc. 99/03451-4. Foi implementada e avaliada operacionalmente em uma unidade piloto, uma rede com fio de instrumentação inteligente com sensores de solo e válvulas automatizadas. Foi demonstrado que mesmo em uma pequena parcela de 42 por 21m de um pomar de laranjas, há grande variabilidade espaço-temporal de água disponível para as plantas, figura 2.

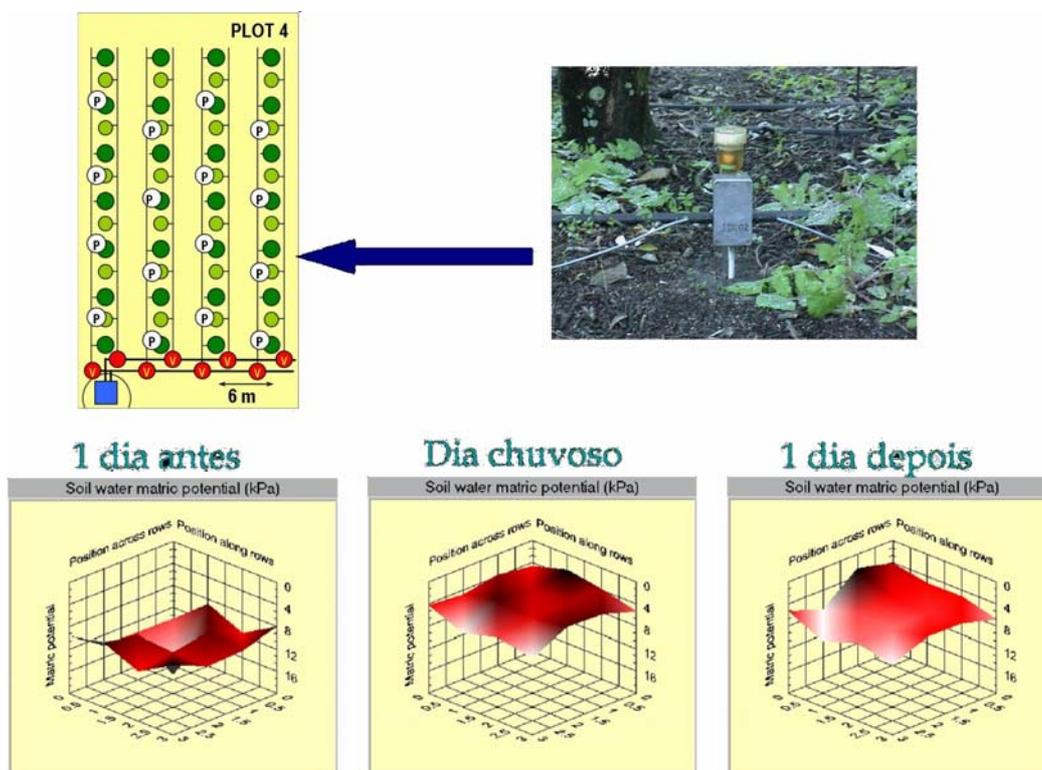


Figura 2: rede de sensores com fio, acima esquerda, distribuição dos sensores, acima direita, sensor, abaixo, variabilidade espacial e temporal do potencial de água no solo.

Torre-Neto e colaboradores, (2005), implementaram uma rede de instrumentação totalmente sem fio para campo e, baseado nessa rede, desenvolveram uma automação da fertirrigação de precisão (especialmente diferenciada) para culturas perenes. Pela importância econômica para o estado de São Paulo, pela logística facilitada e devido à necessidade premente, face à morte súbita dos citros cuja solução indica o uso de sub-enxertos pouco resistentes ao estresse hídrico (Pivetta, 2003 & Coelho et al. 2002/2003), o sistema foi desenvolvido inicialmente para a citricultura.

O sistema foi idealizado para ser de baixo custo, confiável e compatível com as práticas locais de produção de citros e outras culturas perenes, como o café.

Material e métodos

As redes de sensores e atuadores sem fio disponíveis no mercado ainda são, em sua maioria, utilizadas para aplicações industriais e prediais, com características não totalmente favoráveis para utilização em campo agrícola. Sendo assim, uma rede proprietária de sensores e atuadores sem fio foi desenvolvida para monitoramento e controle remoto de áreas agrícolas.

O sistema é constituído de “nós sensores e atuadores”, uma ou mais Estações de Campo (EC), uma estação base (EB) e um kit de Instalação. A figura 3 ilustra a arquitetura do sistema.

Cada Estação de Campo cobre uma área de 100 hectares. A Estação Base é um computador pessoal localizado no escritório da fazenda para gerenciamento global da rede.

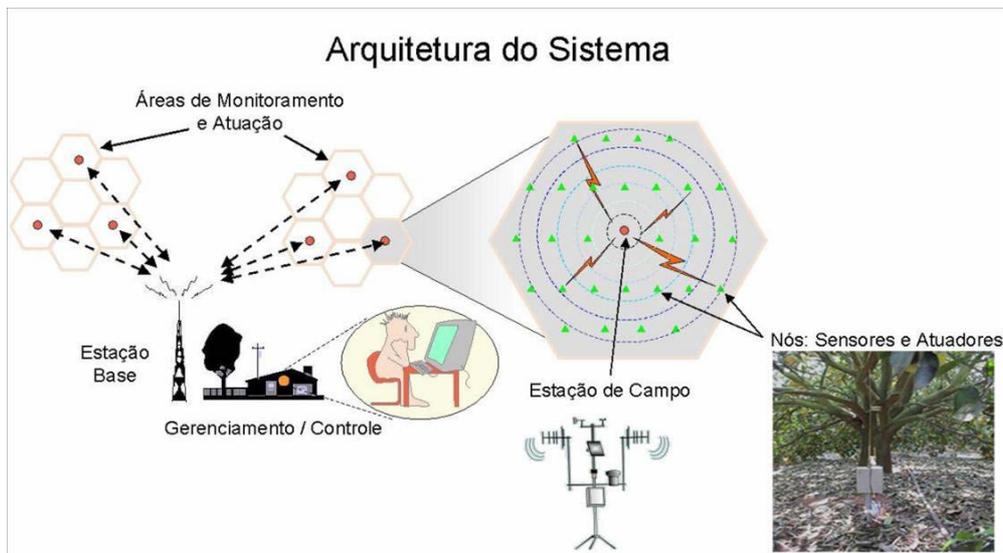


Figura 3: Arquitetura do Sistema de Irrigação a Taxa Variável

Os Nós sensores e atuadores foram desenvolvidos para irrigação por gotejamento a taxa variável, baseados em parâmetros do solo. Existe um nó sensor que mede a umidade e

temperatura numa profundidade específica e um nó atuador que controla válvulas solenóides. Os nós foram desenvolvidos seguindo as seguintes premissas:

- 1- Os nós sensores devem ser distribuídos em uma grade fixa padrão, com espaçamento de 40 metros entre eles, e posicionados sob a copa das árvores;
- 2- Os nós sensores devem ser alimentados por baterias não-recarregáveis e devem durar pelo menos doze meses;
- 3- Todos os nós devem ser resistentes a insumos químicos e
- 4- A instalação, operação e manutenção dos nós, devem ser o mais simples possível, dispensando uma equipe especializada.

Na implementação da rede de sensores e atuadores sem fio, foram tomados os devidos cuidados para evitar problemas como o consumo de energia, redução do alcance de transmissão dos nós e a colisão de pacotes de transmissão. Para isto, o modo de operação dos nós e o protocolo de comunicação foram otimizados para serem energeticamente eficientes, além de seguirem algumas regras como as descritas a seguir:

- 1- O protocolo de comunicação utiliza relações assimétricas do tipo mestre e escravo, que operam no modo de comunicação *pool/response*, ou seja, os nós somente transmitem uma mensagem como resposta a um comando da Estação de Campo;
- 2- Todos os nós são capazes de receber comandos da Estação de Campo a qual estão associados, pois esta tem maior potência de transmissão;
- 3- Os nós que não conseguem transmitir diretamente para a Estação de Campo enviarão os dados para outros nós (por rotas fixas e/ou alternativas) de seu subconjunto, que irão retransmiti-los para a estação de campo correspondente e
- 4- Os pacotes (mensagem + campos de controle) poderão ser divididas em pedaços menores para atender limitações do rádio e/ou da memória disponível.

Os módulos que fazem parte do sistema serão descritos em seguida.

- Nó sensor

O nó sensor é o módulo que realiza aquisição de dados referentes aos parâmetros do solo, que serão utilizados para modelar as zonas de manejo. Estes dados são de fundamental importância para a tomada de decisão do sistema de irrigação. Com uma programação pré-determinada os se comunicam com a Estação de Campo, enviando dados dos sensores nele instalados e assim, proporcionam a criação de mapas de umidade do solo espacialmente variados.

A montagem básica do nó sensor é constituída por um sensor capacitivo, figura 4, para a medida da umidade do solo, sensores para as medidas da temperatura do solo e do ar, uma caixa de alumínio com uma antena instalada na parte superior, figura 5, e circuito eletrônico acondicionado no interior da caixa.



Figura 4: Foto sensor capacitivo.



Figura 5: caixa de alumínio, antena, bateria e circuitos do nó sensor.

Seu circuito eletrônico é composto de um microcontrolador (PIC16F88 da Microchip) que coleta, processa e armazena os dados dos sensores, e um transceptor (transmissor + receptor) para comunicação sem fio por radiofrequência em 916MHz (DR-3000 da RF Monolithics), figura 6, responsável por enviar dados e receber comandos, além de outros componentes discretos secundários. A alimentação do sistema é feita por uma bateria de Lítio de 3,6 VDC cuja autonomia é de 12 meses. Optou-se pela escolha de componentes com tecnologia “*nanowatt*”, priorizando a economia de energia.



Figura 6: circuito eletrônico do nó sensor, abaixo a esquerda detalhe do transceptor.

- Nó atuador

Os nós atuadores possuem circuito eletrônico, programa do microcontrolador e construção similar aos nós sensores. A principal diferença é que possuem um circuito de interface para válvulas solenóides e medidores de fluxo, figura 7.



Figura 7: nó atuador e válvula solenóide.

Uma ponte H é utilizada para abrir e fechar as válvulas, devido às mesmas serem do tipo latching, e um circuito é utilizado para condicionar o sinal do medidor de fluxo, que é conectado a um pino contador de pulsos do microcontrolador. Os nós atuadores são alimentados com quatro células de bateria NiCd de 1,2 VDC, com capacidade de carga de 1000mAh, e por consumirem mais energia que os nós sensores, são equipados com um painel solar foto-voltaico de 1 Watt para recarga das baterias. O ciclo de funcionamento, o intervalo de aquisição e a comunicação de dados dos nós atuadores são os mesmos dos nós sensores.

- Estações de Campo (EC).

As estações de campo são os elementos concentradores de dados da rede de sensores sem fio. Exercem as funções de receber, processar e enviar dados para a Estação Base. O envio é feito por meio de conexões JDBC (*Java Database Connectivity*), mantendo o banco de dados da Estação Base sempre atualizado. Elas também têm a função de repassar comandos para configurar a operação e atuação dos nós e realizar o roteamento da rede de comunicação. A área de cobertura do sinal de rádio de cada Estação de Campo é de aproximadamente 100 hectares, cobrindo aproximadamente 400 nós sensores com espaçamento de 40 metros. O Protocolo de comunicação de dados está preparado para monitorar 65 mil nós.

As Estações de Campo são compostas por uma CPU, uma mini-estação climatológica, uma interface de rede sem fio (WLAN) e um driver de comunicação com os nós. Além disso são alimentadas por um conjunto de duas baterias automotivas de 55Ah, recarregadas por um painel solar de 70 Watts, figura 8.

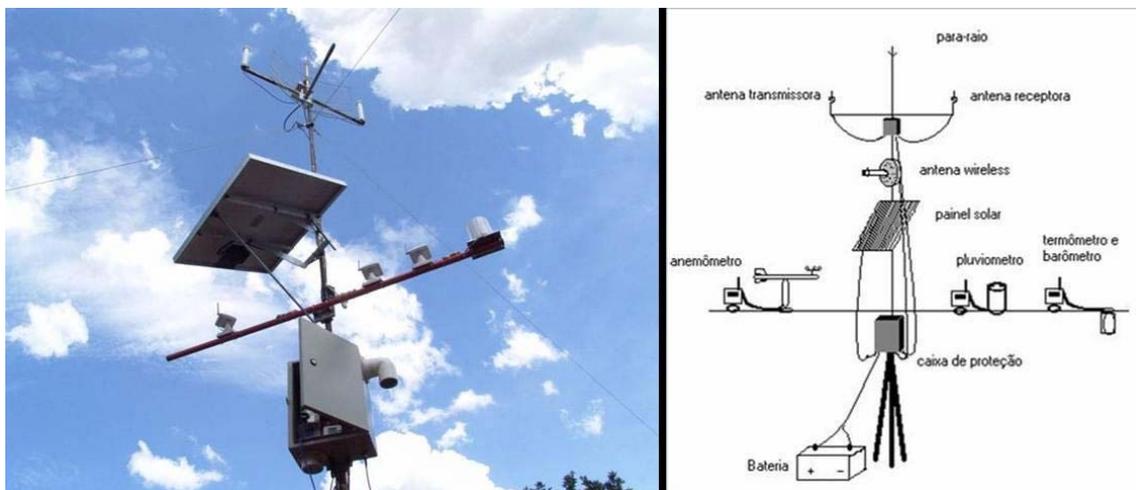


Figura 8: Estação de Campo

A CPU é um PC104 baseado no processador NS Geode GX1, de 300MHz e *chipset* NS CS5530A (PCM-3550 da Advantech), com 256 Megabytes de memória RAM e uma memória *Compact Flash* de 1 Gigabyte funcionando como disco de sistema. Foi instalado nessa memória o sistema operacional Linux, distribuição Slackware 10.2, com *Kernel* 2.4, e todo programa computacional foi desenvolvido utilizando as linguagens de programação ANSI C e Java. A estação climatológica é uma WMR-918 da Oregon Scientific, conectada em uma das duas portas seriais RS-232 do PC104. A interface de rede sem fio é um *Access Point* da Level-One, modelo WAP-0003, conectado ao PC104, e que por sua vez está conectado a uma antena externa direcional com 18 dBi de ganho, a fim de estabelecer o *link* Wi-Fi com a Estação Base.

Os serviços mais comuns do protocolo TCP/IP como FTP, SMTP, e SSH são utilizados para enviar e receber dados, arquivos e comandos para, e da Estação Base. Os arquivos de configuração são gerados no formato XML.

O *driver* de comunicação de dados é o único componente não comercial da Estação de Campo. Ele foi desenvolvido com um microcontrolador, conectado a um módulo de

rádio DR-3000 para transmissão e outro para recepção de dados dos nós, além de uma interface serial RS-232 para comunicação com a CPU do PC104. Ele executa a porção de mais baixo nível do protocolo de comunicação de dados. O nível de potência de transmissão é aumentado para 20 dB para que a Estação de Campo possa ter um raio de abrangência de aproximadamente 750 metros.

- Estação Base

A Estação Base é utilizada para centralizar todas as operações e dados do sistema. É composta por um computador pessoal e um *Access Point* externo para acesso à rede sem fios (WLAN) da Level-One, modelo WAB-1000A, conectado a uma antena externa omni-direcional que realiza a comunicação com as Estações de Campo.

Uma base de dados espaço-temporal foi desenvolvida juntamente com um programa computacional de gerenciamento com funcionalidades de Sistemas de Informação Geográficas (SIG), para operar sobre o sistema e auxiliar na tomada de decisões para a irrigação à taxa variada.

Essa base de dados, que utiliza o servidor PostgreSQL, de código livre e com extensão espacial (PostGIS), possui todas as informações referentes às entidades do sistema, tais como coordenadas geográficas de posicionamento global dos nós, modos de configuração e operação, bem como informações sobre a própria propriedade em que o sistema esteja implantado.

O programa computacional de gerenciamento foi desenvolvido em C++ e as funcionalidades de SIG utilizadas fazem parte da biblioteca TerraLib, também de código livre, desenvolvida pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Por meio desse programa computacional, é possível realizar programações da irrigação em dois modos distintos: convencional e inteligente.

No primeiro modo, as regiões que constituem as unidades de irrigação são fixadas na instalação do sistema e não devem ser modificadas. Este modo possibilita apenas a automação do acionamento de válvulas.

Já no segundo modo, essas regiões são definidas de acordo com a observação de seqüências de mapas de umidade do solo, gerados pelo mesmo programa computacional, permitindo a caracterização de zonas de manejo pelo próprio usuário do sistema. A partir desta caracterização, a malha hidráulica da irrigação na área em questão deve ser reajustada ou projetada (no caso de início de cultivo irrigado), para que as zonas formadas possam ser irrigadas de maneira espacialmente diferenciada. Assim, o sistema permite que o usuário opere sabendo onde, quando e quanto irrigar, mantendo cada região irrigada o mais próximo possível da umidade do solo ideal, minimizando o consumo de água e energia elétrica sem afetar a produtividade.

- Kit de instalação

O kit de instalação tem como função a configuração dos nós da rede sem fio, sejam eles sensores ou atuadores, no ato da instalação, na manutenção ou ainda para realizar coletas imediatas de dados, figura 9.

Ele consiste em um conjunto de programas computacionais, que usam comunicação Bluetooth com GPS e um *driver* para comunicação com os nós via radiofrequência. Estes programas computacionais proporcionam a coleta de dados geográficos e alfanuméricos, acesso às configurações e funções do nó, juntamente com a navegação por pontos referenciados.



Figura 9: kit de instalação, a) palm e b) gps.

Os programas computacionais foram desenvolvidos na linguagem de programação SuperWaba com a plataforma Eclipse, visando a utilização pelos usuários finais, figura 10.

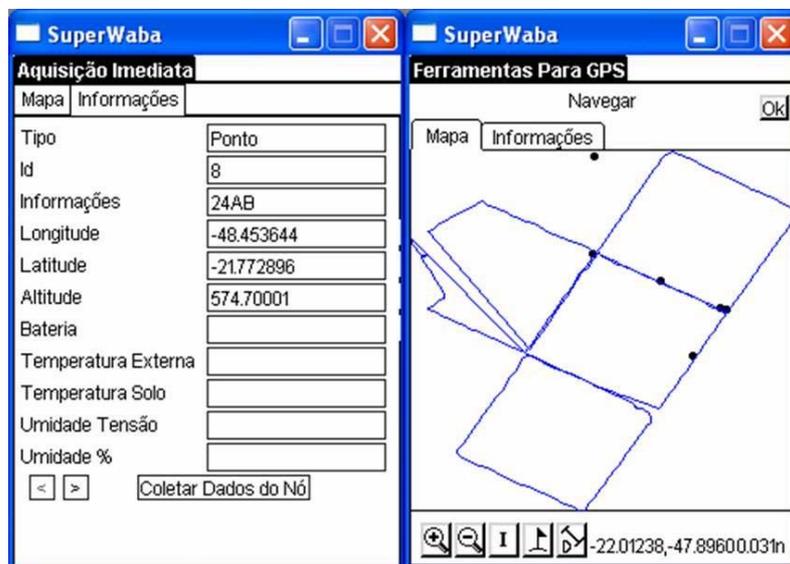


Figura 10: telas de programas computacionais do kit de instalação.

Resultados e discussões

Uma unidade piloto de seis hectares foi instalada e colocada em operação para avaliação da operabilidade do sistema em condições de campo. Foi selecionada uma plantação de

laranja de 10 anos de vida, com árvores de 3 metros de altura. Há vinte e cinco nós sensores e uma Estação de Campo em operação desde janeiro de 2006, figura 11.

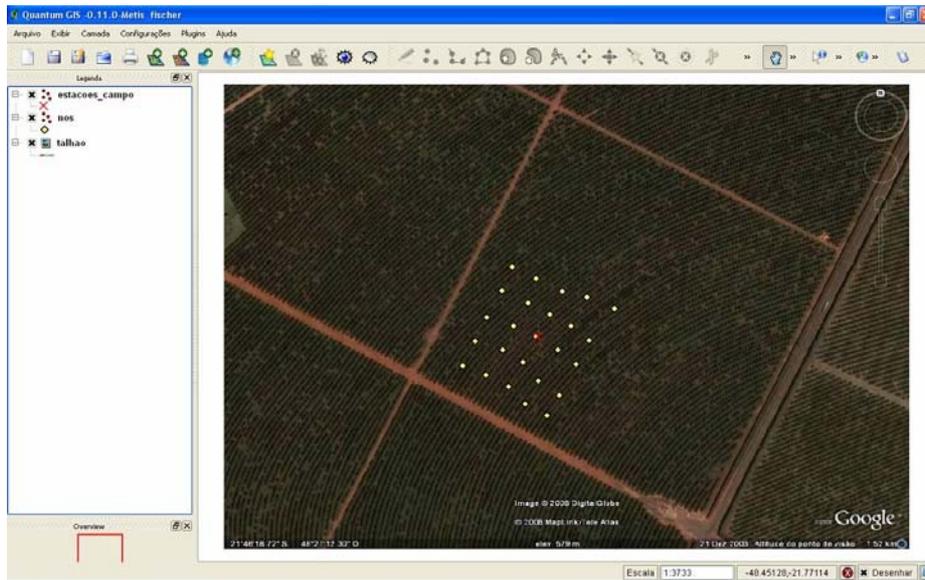


Figura 11: local da unidade piloto, Fischer Agropecuária S/A, \diamond - localização dos nós sensores, \times - localização da Estação de campo.

O sistema foi programado para aquisição de dados a cada 15 minutos, e transmissão de dados à Estação a cada hora. A figura 12 mostra um mapa de umidade do solo obtido pela interpolação de dados dos 25 sensores em um momento arbitrário.

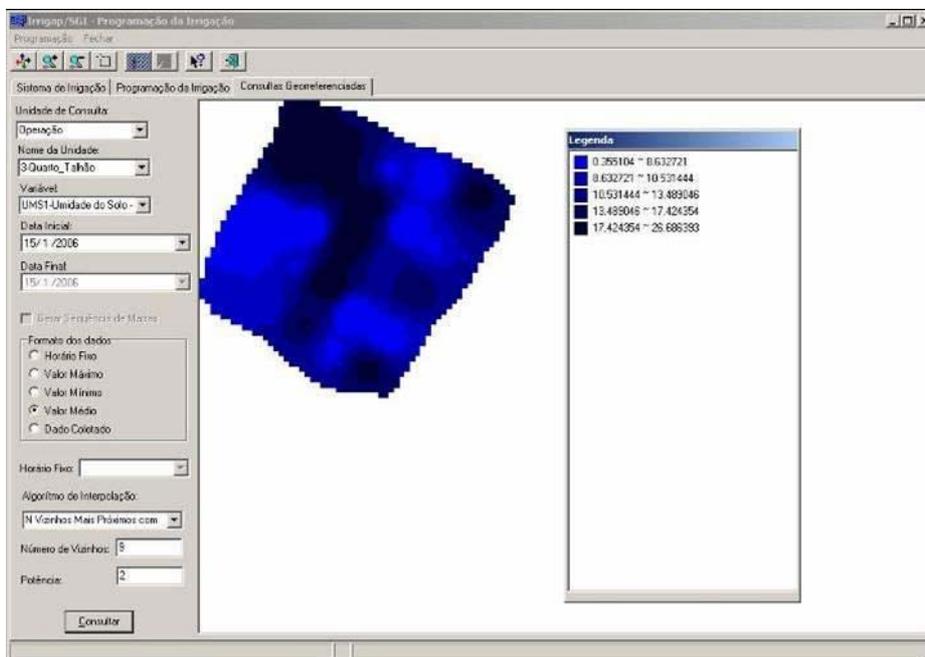


Figura 12: Mapa de umidade do solo em um momento arbitrário.

Por meio de mapas desse tipo, que fornecem informações espaço-temporais instantâneas de disponibilidade de água no solo, pode-se verificar que o sistema é viável para mapeamento e controle de irrigação.

Os próximos passos incluem a expressão desta unidade piloto para vinte e cinco hectares, com cem nós sensores instalados nesta área, além da instalação dos nós atuadores que estão em fase final de testes em laboratório.

Seqüências de mapas de umidade do solo podem ser obtidas para cada área. O resultado esperado pela análise destes mapas é ter a área dividida em cinco ou mais zonas de manejo com diferentes necessidades de irrigação, figura 13. Estas zonas podem refletir a variabilidade espacial para a combinação de diferentes fatores como: textura do solo, topologia do solo e necessidades individuais de cada árvore. O sistema de irrigação poderia ser modificado para irrigar locais específicos na plantação, de acordo com estas zonas de manejo.

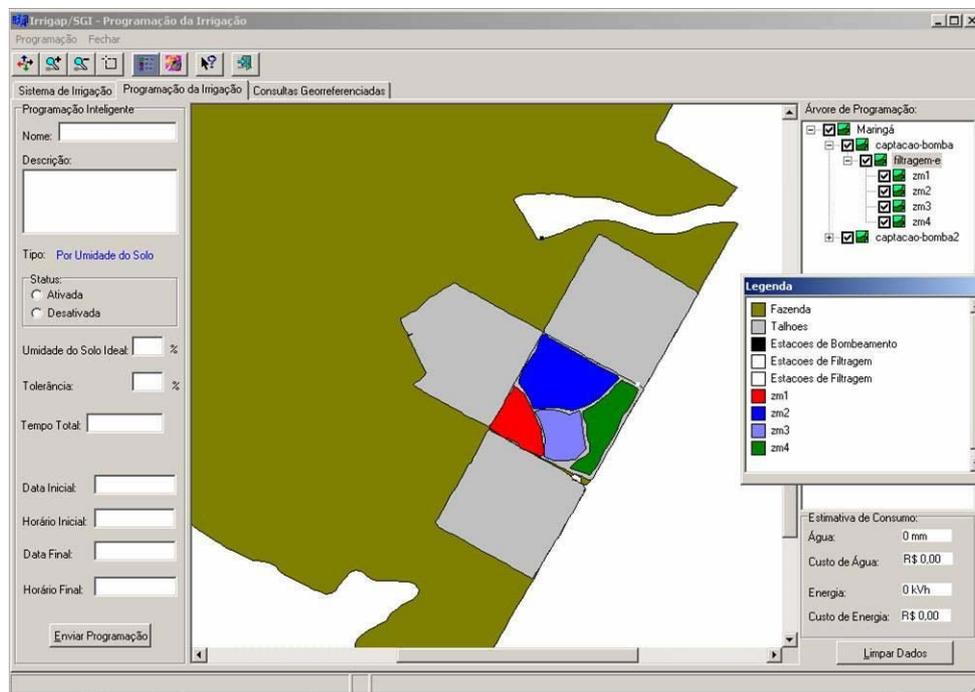


Figura 13: Mapa de zonas de manejo

Para cada zona seria endereçada uma válvula automática estabelecendo um laço de controle com seu próprio ponto de ajuste. Este ponto de ajuste seria comparado com média de umidade do solo na zona, obtida pelo conjunto da rede de sensores condizentes com a mesma.

O consumo da água seria avaliado por um medidor de fluxo automático na entrada da área e comparado ao consumo das áreas convencionais automatizadas.

Conclusão

Neste trabalho foi descrito um sistema automatizado para controle espacialmente diferenciado da irrigação por gotejamento. O controle foi construído com componentes de baixo custo para mapear a unidade do solo, monitorando temperaturas e controlando válvulas solenóides de acordo com a necessidade específica de agrupamentos pré-

determinados de árvores de um pomar de 25 hectares. O sistema pode ser remotamente controlado, e o comportamento de seus vários componentes mostrou-se confiável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fischer S/A Agropecuária pela disponibilidade da área para instalação da unidade piloto; ao FUNDECITRUS, à UNB e à UNICAMP pela colaboração científica; e à FAPESP, pelo financiamento do projeto PIPE “Desenvolvimento de plataforma tecnológica para irrigação de precisão em culturas perenes”, processo nr. 04/05464-6

Referências Bibliográficas

FAO Statistical Databases. (2005). <http://apps.fao.org>

AUERNHAMMER, H., ed. Special Issue: Global Positioning Systems in Agriculture. **Comp. & Elec. in Ag.**, v.11, n.1, 1994.

BALASTRIERE, L.A. Aplicação localizada de insumos-ALI: um velho conceito novo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., Campinas, 1994. **Resumos**. Campinas, SBEA, 1994. p.248.

COELHO, E. F.; MAGALHÃES, A. F. de J. Irrigação e fertirrigação na citricultura. *ITEM: irrigação & tecnologia moderna*, Brasília, n. 56/57, p. 27-31, 2002/2003.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão, parte I: O que é e estado da arte em sensoriamento. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v.17, n.2, p.97-107, dez. 1977.

NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O.; JÜRSCHIK, P.; KÜHN, G.; HOPMANS, J.W. Precision agriculture: challenges and opportunities of instrumentation and field measurements. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1, São Carlos-SP, nov. 1996. **Anais...** São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1996.

PIVETA, M. Risco de infarto no laranjal. *Pesquisa FAPESP*, São Paulo, n. 85, p. 16-20, mar. 2003.

ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E., ed **Precision agriculture**: proceedings of the 2nd International Conference, June 1995. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1995.

ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E., ed. **Precision agriculture**: proceedings of the 3rd International Conference, June 1996. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996.

SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; EVANS, D.E.; USREY, L.J. A site-specific irrigation system for the southeastern USA coastal plain. In: STTAFORD, J.V., ed. **Precision**

Agriculture, 97: papers presented at the First European Conference on Precision Agriculture, Warwick University Conference Centre, UK, 7-10 September 1997. Oxford: BIOS, 1997. v.1, p.337-344: Spatial variability in soil and crop.

SCHUELLER, J.K. A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production. **Fertilizer Research.** v.31, p.1-34, 1992.

SCHUELLER, J.K. Thechnology for precision agriculture. European Conference on Precision Agriculture, 1 p.33-44. Set., 1997.

SMITS, F.M. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. The Bell system technical journal, may, p.712-718, 1958.

STAFFORD, J.V.; MILLER, P.C.H. Spatially variable field operations. **Comp. & Elec. in Ag.**, v.14, n.2/3, 1996.

TORRE-NETO, A.; SCHUELLER, J.K.; HAMAN, D.Z. Automated System for Variable Rate Microsprinkler Irrigation in Citrus: A Demonstration Unit. In: Third European Conference on Precision Agriculture, 3, Montpellier/France, June 18-20 2001. **Proceedings...** 2001. p.725-730. CD-ROM.

WALL, R.W.; KING, B.A.; MCCANN, I.R. Center-pivont irrigation system control and data communications network for real-time variable water application. In:

ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E., ED. **Precision Agriculture:** proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture, June 23-26, 1996, Minneapolis, Minesota. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1996. p. 757-766.