

Sumário

PARÂMETROS DE SOLO-ÁGUA PARA A ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO E AMBIENTAL

Camilo de Leis Teixeira de Andrade

Eugênio Ferreira Coelho

Lairson Couto

Elio Lemos da Silva.....01

MONITORAMENTO PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO: INSTRUMENTAÇÃO, AUTOMAÇÃO E MÉTODOS

Reinaldo L. Gomide.....133

MANEJO DE IRRIGAÇÃO PARA GRANDES CULTURAS

Euzebio Medrado da Silva

Juscelino Antônio de Azevedo

Antônio Fernando Guerra

Sebastião Francisco Figuerêdo

Lucilene Maria de Andrade

Jorge Cesar dos Anjos Antonini.....239

MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM FRUTEIRAS

José Monteiro Soares

Francisco Fernandes da Costa

Clemente Ribeiro dos Santos.....281

MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM HORTALIÇAS NO CAMPO E EM AMBIENTES PROTEGIDOS

Washington L. C. Silva

Waldir A. Marouelli.....311

CRITÉRIOS DE USO E LICENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Raymundo José Santos Garrido.....349

Capítulo 2

MONITORAMENTO PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO: INSTRUMENTAÇÃO, AUTOMAÇÃO E MÉTODOS

2.1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo da irrigação é fornecer uma quantidade adequada de água às plantas para prevenir o estresse hídrico que pode afetar, tanto em quantidade como em qualidade, a produção da cultura. A quantidade de água requerida em cada irrigação e o momento de aplicação dessa água são parâmetros governados pelas condições climáticas local, tipo de cultura e seu estágio de crescimento, profundidade efetiva do sistema radicular e umidade do solo. Sempre que a água proveniente da precipitação efetiva não for suficiente para atender a demanda hídrica das plantas e a disponibilidade de água do solo for esgotada à níveis que irão provocar redução significativa de produtividade, haverá necessidade de suprir as necessidades hídrica das culturas com a aplicação de água de irrigação.

Para entender e poder prever a quantidade de água necessária em uma irrigação de forma precisa e acurada, o contínuo solo-planta-atmosfera deve ser considerado como um sistema dinâmico, fisicamente integrado, onde os processos de transporte ocorrem interativamente. Neste, os fatores meteorológicos de superfície controlam a força de demanda hídrica, atuando como “dreno”, os de solo controlam a fonte de água e os ligados à planta controlam a transmissão de água da fonte para o dreno. Daí, um sistema de monitoramento e controle baseado em medições, em tempo real, de parâmetros ligados ao contínuo solo-planta-atmosfera podem e devem ser usados para determinar a necessidade hídrica das culturas e estabelecer estratégias de manejo de irrigação, visando otimizar e racionalizar a utilização da água e da energia com melhoria de produtividade das culturas.

No Brasil, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação.

Como os sistemas agrícolas irrigados têm uma utilização mais intensiva das áreas, com dois ou mais cultivos por ano, aumenta o risco de danos ambientais e de problemas na cultura, tais como, incidência de pragas e doenças, desnutrição de plantas, plantas daninhas, etc. A aplicação da água de irrigação em excesso pode levar a poluição de rios, lagos e lençol freático, devido a lixiviação de elementos tóxicos e nutrientes, e em quantidade insuficiente pode resultar em estresse hídrico da cultura e afetar o crescimento normal das plantas. Tudo isto pode comprometer todo o sistema de produção.

O monitoramento automático para manejo da irrigação é ainda incipiente no Brasil. Com o uso de técnicas de microprocessamento, da microeletrônica e de sensores é possível reverter este quadro e buscar alternativas de instrumentação visando o controle, a aquisição, a transferência e o armazenamento de dados envolvidos nas medições. O mais atrativo é que a automação é uma ferramenta de tomada de decisão da programação das irrigações em condições de campo, uma vez que os sensores facilitam o processamento automático dos dados, estimulando o uso de microcomputadores, de técnicas de inteligência artificial e de softwares no gerenciamento e controle de todo o processo. Com isso é possível um controle mais preciso de aplicação de quantidades reais de água para as plantas e uma maior eficiência de uso de água, assegurando a sustentabilidade do sistema agrícola irrigado e a preservação do meio ambiente.

Neste capítulo, o monitoramento para manejo da irrigação será apresentado e discutido enfatizando-se a automação, a instrumentação, os sensores e os métodos utilizados para determinar quando aplicar a água de irrigação e a quantidade de água necessária em cada irrigação por meio de medições de variáveis relacionadas ao contínuo solo-planta-atmosfera.

2.2 AQUISIÇÃO E REGISTRO DE DADOS

Uma das dificuldades encontradas em medidas automáticas é o registro dos dados obtidos em campo. O registro de dados da forma automática possibilita, entre as principais vantagens, a eliminação de erros humanos na leitura de sensores; erros de digitação, perdas de dados, sincronismo de leitura entre vários instrumentos e frequência de leitura com intervalos precisos.

Os primeiros registradores de dados foram mecânicos, sendo efetuados os registros através de papéis, como encontrados em sismógrafos. Uma pena se deslocava no eixo da intensidade da variável a ser medida e o papel no sentido ortogonal, de forma a obter um registro gráfico da variável no tempo.

Com o desenvolvimento da eletrônica, esses registradores foram evoluindo, tendo sido incorporados, inicialmente, acionadores de penas eletrônicos e posteriormente surgiram modelos em que os registros eram efetuadas em fitas magnéticas. Nessa época, o grande desafio, para o uso em campo, era melhorar o meio de proteger o equipamento contra as intempéries da natureza e torná-lo portátil.

Com o advento da microeletrônica, em especial dos microprocessadores digitais, a redução das dimensões se tornaram viáveis. Com o crescimento vertiginoso do uso de microprocessadores, o custo se reduziu consideravelmente, permitindo a sua aplicação em equipamentos de leitura e armazenamento de dados em campo. Incorporando novas funções, como a comunicação direta com um computador, o que eliminou os erros decorrentes da digitação na passagens de dados.

As características principais para que um instrumento microprocessado portátil possa trabalhar em campo, incluindo-se máquinas agrícolas, são ditadas pela condição em que o equipamento irá trabalhar. As condições de campo são extremamente adversas e entre elas pode-se citar: grandes distâncias e variabilidade espacial; grandes variações da umidade relativa do ar; grandes oscilações de temperaturas; presença de orvalho, poeiras, ventos fortes, raios solares, fungos e insetos no interior do equipamento; possibilidades de fortes chuvas e granizo; indução de altas tensões no circuito através de raios; baixa qualidade da energia elétrica; qualidade da mão-de-obra; e presença de vibração.

Para atender aos requisitos das condições de uso o equipamento deve possuir, entre as características de construção e de projeto eletrônico, dimensões reduzidas e baixo consumo. Tais características propiciam uma devida proteção ao circuito eletrônico e possibilita o projeto de caixas com proteções mais eficientes e de fácil transporte.

No mercado já existe uma gama relativamente grande de coletores de dados. Os mais comuns são os coletores para uso em controle de estoque e terminais de vendas, com inserção manual de dados através de teclados ou automáticos acoplados a um leitor ótico com códigos de barra. Esse tipo de equipamento facilita a transferência dos dados para o computador, eliminando muitos dos erros de digitação.

A outra classe de coletor de dados é o coletor de dados para leitura de sensores. A leitura de sensores é efetuada automaticamente em períodos pré-programados. Os coletores de dados universais podem ser programados pelo próprio usuário e possibilitam configurar um sistema de aquisição de dados com vários sensores, de acordo com a necessidade. A seguir são listados alguns dos elementos que podem compor um sistema de aquisição de dados: a) *elemento*

sensor/transdutor: é o elemento em contato com o mundo real. Um transdutor transforma um sinal a ser medido em um outro tipo (geralmente elétrico). É formado pelo elemento sensitivo primário, elemento conversor primário e elemento conversor de variável. Atualmente, existem no mercado sensores inteligentes, que incorporam o elemento de conversão de sinal e de transmissão de dados digitais diretamente a um microcomputador; b) **elemento sensitivo primário:** elemento que é parte do sensor e que entra em contato com o mundo real. Pode ser uma concha que recebe o vento para transformar a variável de interesse (velocidade do vento) em rotação; c) **elemento conversor de sinal:** elemento que converte uma variável em outra. Por exemplo: rotação em sinal elétrico, sinal analógico em digital, voltagem em corrente, entre outras. Em sensores, é o elemento que incorpora o princípio de transdução; d) **elemento armazenador de dados:** elemento que armazena os dados digitais possibilitando arquivar esses dados. Fisicamente pode, ser um semiconductor (memória), um disco magnético ou uma fita magnética; e) **elemento de processamento de dados:** dados são processados por microprocessadores ou microcontroladores programáveis, antes de serem apresentados. Em alguns casos o elemento de processamento de dados pode ser um microcomputador; f) **elemento transmissor de dados:** fisicamente, pode ser um simples par de fio que interconecta os sensores a rádios, é nesse meio que se necessita protocolos para conectividade; e f) **elemento de apresentação de dados:** a apresentação pode ser um indicador luminoso em um vídeo de um microcomputador.

A Figura 2.1 ilustra um diagrama em blocos onde estão presentes uma configuração relativamente padrão dos sistemas de aquisição de dados utilizando coletor de dados para sensores. Os três blocos maiores representam sensores, coletor de dados e um microcomputador. Os sensores são formados por um elemento sensitivo primário e um elemento conversor. O sinal da leitura é enviado a um coletor de dados através de fios e cabos até um coletor de dados. O coletor de dados, então, converte os sinais em formato digital e os armazena em memória digital. O elemento manipulador de variável está presente apenas para indicar que um sinal digital ou até analógico é manipulado convenientemente até que os dados sejam armazenados corretamente na memória. O elemento transmissor de dados poderia estar presente para garantir a comunicação entre coletor de dados e microcomputador. Observa-se que o elemento transmissor de dados poderia estar também entre sensores e coletor de dados, entretanto, não é comum encontrar tal configuração. O elemento transmissor de dados presente no microcomputador é, além de um circuito eletrônico (normalmente I/O serial RS232), um programa de interface. Esse programa deve ser fornecido junto com o coletor de dados e tem a função de retirar os dados armazenados

no coletor de dados e armazená-los no disco (arquivo) do microcomputador. Com os dados armazenados em arquivo, o processamento e análise podem ser efetuados através de aplicativos comerciais, como planilhas eletrônicas (por exemplo, Lotus 123, Quatro Pró, Excel, entre outras).

2.3 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS DE MEDIÇÃO METEOROLÓGICOS

As observações meteorológicas de superfície são de suma importância na determinação da necessidade hídrica da cultura, ou seja, evapotranspiração (ET), um processo combinado de transferência de água, na forma de vapor, de uma superfície coberta com vegetação para a atmosfera, incluindo a evaporação direta das superfícies do solo e das plantas e a transpiração das plantas. Nessa transferência de vapor d'água, os elementos do clima controlam a força de demanda hídrica da atmosfera, atuando, no contínuo solo-planta-atmosfera, como "dreno". A automação dessas medições, em tempo real, facilita a obtenção da ET e, conseqüentemente, permite estabelecer estratégias de manejo de irrigação, determinar o volume de água necessário aos sistemas agrícolas, principalmente os irrigados, e dimensionar sistemas de distribuição e de armazenamento de água.

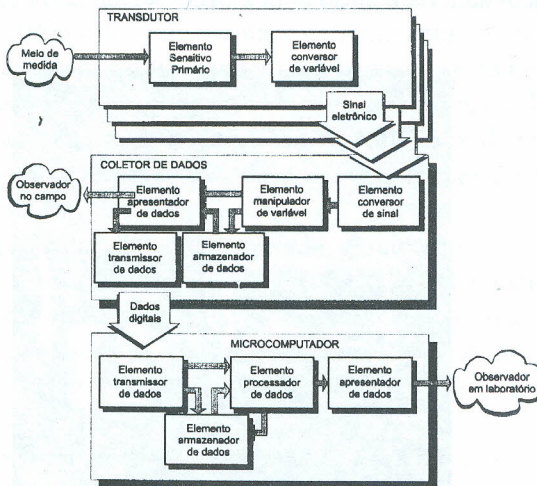


Figura 2.1- Configuração de um Sistema de Aquisição de Dados normalmente encontrado em coletores de dados (topologia de transdutores em estrela).

Estações Meteorológicas Automáticas

As estações meteorológicas automáticas são utilizadas para medir e registrar os parâmetros meteorológicos, a nível de superfície, de forma precisa e acurada, em intervalo de tempo programável. Comercialmente, muitos tipos de estações automáticas são disponíveis. No entanto, dar-se-á ênfase apenas àquelas que possuem sistemas eletrônicos digitais, que funcionalmente devem apresentar: sensores para prover sinais eletrônicos dos parâmetros meteorológicos, circuito eletrônico para ampliar e converter os sinais para valores digitais e meio para armazenamento dos dados coletados a nível local (Figura 2.2).

O sistema de aquisição de dados das estações automáticas é totalmente integrado, envolvendo dataloggers, sensores e computadores portáteis (notebooks). A fonte de energia é proveniente de um painel solar, baterias ou adaptadores/conversores de energia de corrente alternada. Quando em funcionamento, a estação é programada para fazer leituras nos sensores a intervalos de tempo de um minuto e calcular as médias dos parâmetros registrados a cada intervalo de 30 minutos. Apenas as médias dos dados são armazenadas no datalogger, para futura transferência, na forma de arquivo de dados para disquete ou transmissão à distância. O intervalo de varredura dos sensores e o cálculo de médias dos parâmetros podem ser alterados, por meio de programação adequada, de acordo com a necessidade do usuário.

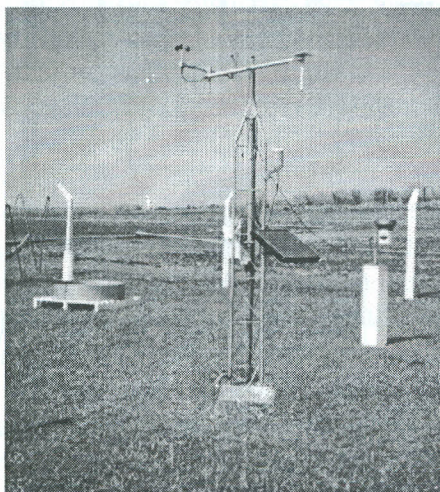


Figura 2.2. Configuração típica de sensores de uma estação meteorológica automática para fins de manejo de irrigação (EMBRAPA Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG).

A configuração de uma estação meteorológica automática é realizada de acordo com a finalidade de sua utilização. Geralmente, os sensores são selecionados para aplicação em áreas como bioclimatologia, agrometeorologia, engenharia de irrigação, agricultura, defesa civil (gerência e/ou previsão de incêndios, segurança, saúde, etc.). Para fins de manejo de irrigação, uma configuração típica deveria envolver medições das seguintes variáveis meteorológicas: temperatura e umidade relativa do ar, irradiância solar global e saldo de radiação, velocidade e direção do vento, precipitação, evaporação da água do tanque classe A, albedo e temperatura do solo (Figura 2.2). TANNER (1990) fornece detalhes de características de operação, funcionamento, resolução, precisão, sensibilidade, estabilidade, tipo de sinal gerado e endereços de distribuidores e fabricantes de vários sensores usados em estações automáticas.

A temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e a umidade relativa do ar (%) devem ser registrados a 1,5 m de altura e os sensores instalados dentro de abrigo meteorológico para evitar a incidência direta de radiação solar durante o dia e proteger do resfriamento devido a ondas longas durante a noite. Um elemento sensor muito usado para medir a temperatura do ar é o termômetro de resistência de platina (TRP, 1000 Ω), encapsulado em cerâmica, com características de estabilidade, confiabilidade e resposta extremamente rápida, assegurando uma transdução precisa da magnitude da temperatura do ar. Para a umidade relativa do ar, é comum a utilização de um sensor capacitivo. Ambos condicionam sinais de saída de 0 a 1000 mV e são montados em uma única sonda (Vaisala, HMP 35C, Figura 2.2). Além destes, também são utilizados para medir a temperatura do ar os termistores e termopares (TP). Os termistores e TRP's, mudam as suas resistências com a temperatura e já vêm calibrados de fábrica. A umidade relativa do ar sempre tem sido uma das variáveis ambientais mais difícil de ser medida com precisão.

A radiação solar global é registrada, geralmente, em W m^{-2} , a 1,5 m de altura do solo, com um sensor que mede a radiação global incidente por meio de um detector fotovoltaico de silício, acondicionado em uma peça maciça (LICOR, Figura 2.2). O sensor possui uma base nivelável de alumínio, com aparato mecânico complementar em aço inoxidável para sua instalação. O sinal de saída desse sensor é de $0.2 \text{ kW m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$.

Os sensores de velocidade e direção do vento são construídos em alumínio para ter baixo peso e alta resistência à corrosão. Ambos devem ser instalados a 2,0 m de altura do solo. A velocidade do vento, em m s^{-1} , é medida com um anemômetro de 3 conchas, que produz um sinal cuja frequência é detectada por meio de um interruptor de luz "light chopper". A direção do vento é medida

em graus, tendo como referência o norte verdadeiro e contado no sentido horário, com um leme e contrapeso conectados a um potenciômetro de precisão (Climatronics CS800-L, Figura 2.2).

A precipitação é monitorada geralmente com um pluviômetro de caçamba oscilante, em mm h^{-1} , que deve ser instalado a uma altura de 1.5 m (TE525, Figura 2.2). A unidade é construída em alumínio anodizado e é composta de um funil, base e caçamba. A seção de captação do pluviômetro apresenta um diâmetro de 158.8 mm. O sensor é calibrado para registrar a precipitação com uma resolução de 0.25 mm através da geração de um pulso magnético.

O albedo geralmente é medido com um elemento sensor de 12 setores de forma triangular, aos quais estão conectados um total de 72 termopares de cobre e constantan. Esses setores são feitos de cobre e as superfícies com os sensores são pintadas alternadamente com tintas nas cores preta (absorvente) e branca (reflectiva). Os termopares estão todos conectados em série para fornecer o sinal de saída desejado. Quando o sensor, instalado a 1,5 m de altura, é exposto à radiação solar, um diferencial de temperatura existirá entre os setores pretos e brancos. Isto gera uma força eletromotriz que é o sinal analógico enviado ao datalogger. Esse tipo de sensor pode apresentar dois lados, um voltado para cima onde é realizada a medição da radiação solar global (direta mais a difusa) e outro para baixo onde é feito o registro da radiação refletida (Qualimetrics, modelo 3023). Desse modo, a saída dos sensores possibilita a investigação de albedo (reflexão), radiação global, refletida e radiação líquida de ondas curtas. O sensor possui um espectro de resposta na faixa de 0.3 a 3.0 μ e um coeficiente de temperatura de 0.25 % $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Os elementos dos sensores são protegidos por uma domo de cristal de vidro e tubos com desecantes em seu interior estão ligados aos sensores para evitar a umidade interna. Os sensores apresentam uma sensibilidade de 0.014868 mV / W m^{-2} .

O saldo de radiação (R_n) pode ser medida por meio de um sensor que é formado por 60 junções de termopilhas; com baixa resistência elétrica (4 Ω) e reduzida susceptibilidade ao ruído. Esse sensor, instalado a 1,5 m do solo, registra a soma algébrica do balanço de todas as ondas de radiação chegando e saindo da superfície, isto é, os componentes referente às ondas curtas e longas. A radiação chegando a superfície consiste da radiação solar direta e difusa mais a irradiação de ondas longas proveniente do céu. A radiação saindo da superfície consiste da radiação solar refletida mais o componente de ondas longas terrestre. O sensor integra todas essas radiações e o sinal enviado para o datalogger já é a R_n disponível a nível de superfície. O sensor possui um espectro de resposta na faixa de 0.25 a 60 μ m e fatores de calibração nominal de 9.6 $\text{W m}^{-2} / \text{mV}$ para valores positivos e 11.9 $\text{W m}^{-2} / \text{mV}$ para valores negativos.

A temperatura do solo pode ser registrada por meio de termistores e termopares a profundidades de 0,02 m e 0,15 m.

Além da aquisição automática dos dados de todos os sensores, o datalogger da estação automática pode ser programado para registrar a voltagem da bateria, em Volts, com a finalidade de se acompanhar o seu recarregamento pelo painel solar (Figura 2.2).

A maioria das estações automáticas vêm acompanhada com software, sendo que algumas para rodar em ambiente Windows, o qual permite ao técnico especialista editar o programa de coleta de dados, monitorar os dados das estações remotas em tempo real, descarregar os bancos de dados armazenados e executar o pré-processamento dos dados para posterior exportação aos diversos softwares de análise de dados (Microsofts Excel, Origin, Quatro Pro, etc.).

Uma vez coletados, os dados armazenados são disponibilizados aos usuários para posterior transferência e descarregamento em microcomputadores, por meio dos módulos externos de memória ou das opções de transmissão à distância, telemetria por modem telefônico, frequência de radio ou satélite (SCD-1, Argos, Goes, Inmarsat e Brasilsat).

Manuais de instruções acompanham as estações automáticas, onde se tem orientações detalhadas de instalação, operação, manutenção e configuração da aquisição dos dados.

Os elementos climáticos obtidos nas estações automáticas podem ser usadas na determinação da ET a partir de métodos desenvolvidos para obtenção da ET de referência (ET_0). A determinação da ET da cultura (ET_c) é obtida pela multiplicação do valor da ET_0 por um coeficiente de cultura (K_c). Todo o processo pode ser automatizado, desde a aquisição dos dados meteorológicos até os cálculos de ET_c , sendo a informação disponível aos usuários quase em tempo real. Com isso, estratégias de tomada de decisão de quando e quanto irrigar podem ser estabelecidas. O problema maior é com o desenvolvimento e ajuste de K_c 's apropriados para cada área (região) e cultura. Mais recentemente, existe alguns esforços na tentativa de usar informação de reflectância como um substituto para o tradicional K_c . Se esta idéia obtiver êxito, é provável que haverá um uso crescente de métodos meteorológicos para a determinação de ET_c .

A equação modificada de Penman, conhecida como Penman-FAO, é usada para determinar a ET_0 , tendo a grama como cultura de referência. As principais modificações envolveram a função devido ao vento, o fator de ajustamento c e a hipótese de que o fluxo de calor no solo (G) é igual a zero

(períodos superiores a 24 horas). A equação é da seguinte forma (DOORENBOS & PRUITT, 1977):

$$ET_o = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2,7 (1 + 0,864 u_2)(e_a - e_d) \right] \quad (2.1)$$

onde, ET_o e R_n são em mm d^{-1} , Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, γ é a constante psicrométrica em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, c é o fator de ajustamento, u_2 é a velocidade média do vento em m s^{-1} e $(e_a - e_d)$ é o déficit de pressão de vapor d'água em kPa . Os valores de c são encontrados em tabela (DOORENBOS & PRUITT, 1977) ou então obtidos da seguinte equação polinomial (ALLEN & PRUITT, 1991):

$$c = 0.68 + 0.0028 UR_{\max} + 0.018 R_s - 0.068 U_d + 0.013 U_d / U_n + 0.0097 U_d (U_d / U_n) + 0.430 \times 10^{-4} UR_{\max} R_s U_d / U_n \quad (2.2)$$

onde, UR_{\max} é umidade relativa máxima diária em percentagem, R_s é a radiação solar global em mm d^{-1} , U_d/U_n é a razão entre a velocidade do vento do período diurno e noturno, e U_d é a velocidade do vento do período diurno (7:00 a 19:00 h) em m s^{-1} . A equação 2.1 quando usada com o fator c resulta o método conhecido como "Penman-FAO corrigido". Para o caso do fator $c = 1$, o método é denominado apenas de Penman-FAO. Conforme pode ser observado, o fator c requer também medições de dados meteorológicos e geralmente é resolvida por meio computacionais.

Uma revisão sobre a tendência de superestimativa da ET_o , pelo método Penman-FAO, tendo a grama como referência, é apresentada por SEDIYAMA (1995). Resultados de trabalhos indicam superestimativas da ordem de 8 a 35 %, dependendo do clima da região. O mesmo autor realça a complexidade do uso do fator c e salienta a importância desse método, utilizado por muitos como padrão internacional, especialmente no Brasil.

SEDIYAMA (1995) fornece uma criteriosa análise dos conceitos e procedimentos metodológicos de cálculos da ET_o , ressaltando as dificuldades de utilização dos lisímetros, dos métodos de balanço de energia e aerodinâmicos ou combinados e da equação de Penman-FAO e dando um enfoque de se estabelecer um critério e uma metodologia para atender a uma nova definição de cultura de referência e a estimativa de ET_o , com base nos procedimentos para revisão do boletim FAO-24, de acordo com SMITH (1991). A nova ET_o é conceituada como sendo a taxa de ET de uma cultura hipotética, com uma

altura uniforme de 0,12m, resistência do dossel da cultura de 70 sm^{-1} e albedo de 0,23. Esse conceito de ET_0 assemelha-se, bem de perto, a ET de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição de umidade. O método combinado de Penman-Monteith tem fornecido melhores resultados de estimativa da ET_0 para o caso dessa cultura hipotética de referência, atendendo tanto a definição original de ET potencial de Penman quanto o conceito de ET_0 da FAO. Para fins de padronização dos procedimentos de cálculos da nova proposta da ET_0 , para estimativas de 24 horas, a seguinte equação foi proposta (SMITH, 1991):

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{900}{T + 275} U_2 (e_a - e_d) \quad (2.3)$$

em que, ET_0 é a evapotranspiração de referência da cultura hipotética em mm d^{-1} , R_n é dado em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, G é o fluxo de calor no solo em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, T é a temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$, U_2 é a velocidade do vento à 2 m de altura em m s^{-1} , $(e_a - e_d)$ é o déficit de pressão de vapor em KPa, Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação em $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, λ é o calor latente de evaporação em MJ Kg^{-1} , γ^* é a constante psicrométrica modificada em $\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($= 1 + 0,33 U_2$) e 900 é o fator de conversão $\text{KJ}^{-1} \text{ Kg K}$.

Tanque Classe “A”

O tanque classe A é um reservatório cilíndrico (Figura 2.3) de 0,254 m de profundidade e 1,206 m de diâmetro, construído com uma chapa de metal não corrosiva e instalado sobre um estrado de madeira de 0,15 m de altura. O nível da água no interior do tanque deve ser mantido dentro da faixa de 0,174 a 0,204 m de profundidade.

A variação de nível da água do tanque Classe “A” pode ser medida com um elemento sensor que fornece um sinal elétrico proporcional ao nível da água do tanque. A unidade é constituída de um flutuador, um contrapeso, uma corrente e uma roda dentada presa à um potenciômetro de precisão de 1 K Ω (NOVALYNX, 1997). O conjunto fica instalado no interior de uma coluna de 20,3 cm de diâmetro e 66,0 cm de altura, com base nivelável, que funciona como poço tranquilizador para o flutuador, visando evitar rápidas flutuações de nível da água durante as medições. Essa coluna é conectada, lateralmente, ao tanque através de um tubo de PVC de 12,7 mm de diâmetro e 2 m de comprimento, formando um sistema de vasos comunicante (Figuras 2.2 e 2.3).

Desta forma, uma mudança no nível da água no interior do tanque corresponderá a uma mesma mudança de nível no interior da coluna. Como a corrente está presa nas extremidades pelo flutuador e contrapeso e encaixada na roda dentada, a oscilação de nível é detectada pelo flutuador e transmitida ao potenciômetro que registra a variação de resistência. O sistema é calibrado para fornecer a leitura do nível da água do tanque em mm. O registro pode ser obtido a intervalos de 30 min.

As medições da evaporação da água do tanque Classe "A" (E_t) são usadas para determinar a ET_o por meio da seguinte equação:

$$ET_o = K_t E_t \quad (2.4)$$

onde, K_t é um coeficiente de correção da E_t . Uma tabela que descreve a variação de K_t em função das condições de tamanho e da natureza da área bordadura, da velocidade do vento e da umidade relativa do ar é apresentada por DOORENBOS & PRUITT (1977). Essa tabela foi obtida de dados experimentais de diversas regiões do mundo, portanto sob diferentes condições climáticas, considerando-se as diferenças de albedo, rugosidade e resistência estomática das superfícies água e vegetação (grama). Mais tarde, SNYDER (1992) desenvolveu a seguinte equação para permitir interpolação dos valores tabelados de K_t e também facilitar o uso em sistemas automatizados de obtenção de dados:

$$K_t = 0,482 + 0,024 \ln(D_b) - 0,000376 U + 0,0045 UR \quad (2.5)$$

em que D_b é a distância (tamanho) da área de bordadura, em m, U é a velocidade do vento em $Km d^{-1}$ e UR é a umidade relativa média do dia em %. O autor salienta que essa equação só deve ser usada dentro dos limites de D_b , U e UR da tabela original.

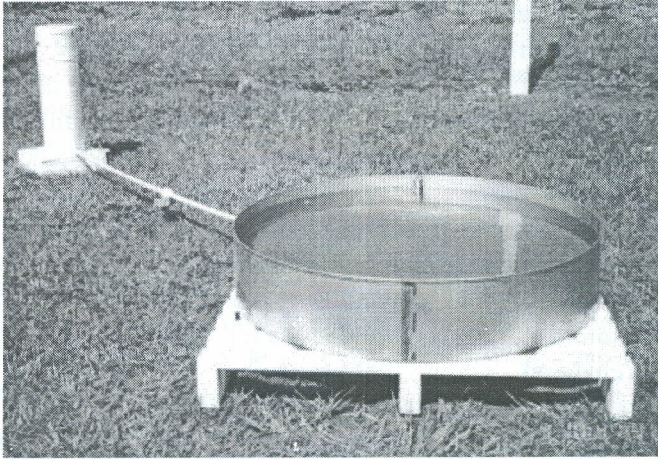


Figura 2.3. Medição automática da evaporação da água do tanque Classe "A" (EMBRAPA Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG).

O método do tanque Classe A é recomendado pela FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1977) e é bastante usado no manejo de irrigação para determinar a ET_c a partir da ET_0 e dos K_c 's.

Lisímetros

Os lisímetros possibilitam a medição direta, em condições de campo, da ET_c . Uma vasta revisão sobre lisímetros é encontrada em ABOUKHALED et al. (1982) e ALLEN et al. (1991). A automação das medidas da ET_c teve um grande avanço principalmente com os lisímetros de pesagem. Os lisímetros de pesagem são, via de regra, recipientes de grande porte, preenchidos com solo e água, dotados de dispositivos de drenagem e apoiados em sistemas de balanceamento mecânico (MAREK et al., 1988; REYENGA et al., 1988; HOWELL et al., 1991). Os sistemas comerciais de grande porte, com boa sensibilidade e resolução e bom desempenho dinâmico, são normalmente montados sob encomenda e possuem custos de instalação desestimuladores para aplicação agrícola (HOWELL et al., 1991).

O peso da água extraída ou adicionada ao conteúdo dos recipientes dos lisímetros de pesagem é medido através de princípios de anulamento, de deflexão e, mais recentemente, através de células de carga comerciais (HOWELL et al., 1991; ALLEN & FISHER, 1991). A acuidade das medidas de quantidades

de água adicionadas ou extraídas dos recipientes é função da sensibilidade estática, da resolução e das características dinâmicas do sistema de medição. Atualmente é comum sistemas com acurácia da ordem de ± 0.05 mm (BACKER et al., 1991). Os registros obtidos dos lisímetros são geralmente tomados como referência para correções e ajustes de alguns métodos de estimativa de ET, validação de modelos numéricos e calibração de uma ampla gama de sensores.

Para obter informações representativas de ET_c ou ET_o , é muito importante que as condições do meio ambiente dentro dos lisímetros sejam representativas das condições externas (solo, plantas, etc.), caso contrário pode haver uma inconsistência muito grande nas medições da ET. Esta é uma grande limitação dos lisímetros em geral.

Um protótipo de lisímetro de pesagem automático foi desenvolvido por GOMIDE et al. (1996) para medições de ET_c em casa de vegetação (Figura 2.4). O sistema é operado com o auxílio de apenas um computador, na forma de placa, e feito de extensômetros elétricos de precisão (strain gages), regulador de voltagem, conversor de sinal analógico para digital e amplificadores operacionais. Os extensômetros transdutores foram montados em uma

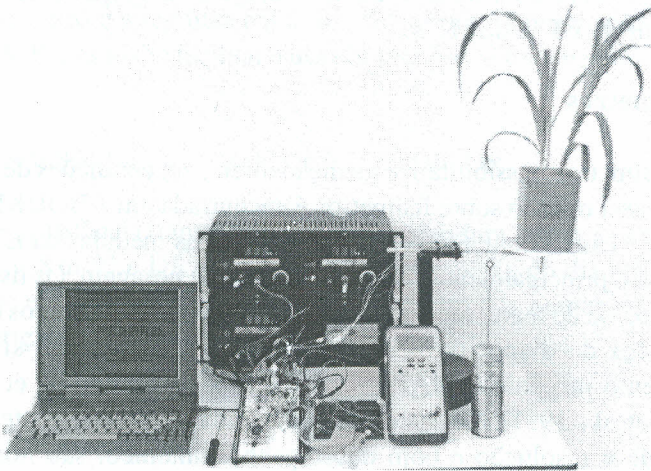


Figura 2.4. Protótipo do lisímetro de pesagem automático para medições de ET_c em casa de vegetação (GOMIDE et al., 1996).

lâmina de alumínio e conectados em um circuito de “ponte de wheatstone” para a medição de variação de peso. O sistema foi calibrado por meio de

carregamento e descarregamento de pesos padrão na plataforma de pesagem e testado em plantas (milho e feijão) cultivadas em vasos de 1,2 Kg. Um programa de computador foi desenvolvido para a aquisição automática de dados. O protótipo mostrou-se sensível para detectar a ET_c com uma sensibilidade de 5,3 mV/g e uma resolução conversor de sinal analógico digital de 3,78 g/N (número inteiro da saída digital).

Balanzo de Energia / Razão de Bowen

O balanço de energia é um método onde são realizadas medições automáticas do transporte vertical de entidades em uma camada de escoamento atmosférico turbulento acima de uma superfície natural rugosa (vegetação), situada a poucos metros da superfície do solo. Nessas condições, entidades tais como as densidades de fluxo de vapor d'água (E) e de calor sensível (H) podem ser expressadas como:

$$E = K_v \frac{\partial q}{\partial z} \quad (2.6)$$

$$H = \rho c_p K_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.7)$$

onde, q é a densidade de vapor, ρ é a densidade do ar seco, c_p é o calor específico do ar seco, T é a temperatura do ar, z é a altura vertical, K_v e K_H são os coeficientes de transporte turbulento (eddy diffusivities) de calor latente e de calor sensível, respectivamente. Os coeficientes K_v e K_H são funções da altura e das condições de escoamento. Os gradientes de vapor d'água e temperatura refletem médias temporais e espaciais. As equações 2.6 e 2.7 são uma extensão da lei de Fick da difusão molecular e algumas analogias adotadas são aproximadas.

A densidade de fluxo de calor latente, L_e , é obtida em termos da pressão de vapor, e , aplicando a lei universal do gás à equação 2.6 e usando o calor latente de vaporização, λ :

$$L_e = \frac{\lambda \rho \epsilon K_v}{p} \frac{\partial e}{\partial z} \quad (2.8)$$

onde, p é a pressão atmosférica e ϵ é a razão do peso molecular da água para o peso molecular do ar seco.

Na prática, gradientes finitos são medidos e um coeficiente efetivo de transporte turbulento (eddy diffusivity) é considerado na determinação do gradiente vertical:

$$L_e = \frac{\lambda \rho \epsilon K_v (e_1 - e_2)}{p (z_1 - z_2)} \quad (2.9)$$

$$H = \rho c_p K_H \frac{(T_1 - T_2)}{(z_1 - z_2)} \quad (2.10)$$

Em geral, o transporte atmosférico de L_e e H é feito por meio de turbilhões que se deslocam aleatoriamente acima de uma superfície natural rugosa, numa tendência de homogeneização de L_e e H com a altura (z). Daí, faz sentido supor que tanto L_e como H sejam igualmente transportados pelo mesmo turbilhão. Nesse condição específica de mesmo escoamento atmosférico turbulento, os coeficientes K_v e K_H podem ser considerados iguais. A razão de H para L_e pode ser usada para a partição da energia disponível na superfície em fluxo de calor sensível e latente. BOWEN (1926) foi o primeiro a propor esta técnica. A razão de Bowen, β , é obtida das equações 2.9 e 2.10 da seguinte forma:

$$\beta = \frac{H}{L_e} = \frac{pc_p (T_1 - T_2)}{\lambda \epsilon (e_1 - e_2)} \quad (2.11)$$

onde $\frac{pc_p}{\lambda \epsilon}$ é a constante psicrométrica, γ .

O balanço de energia da superfície é dado por:

$$R_n = G + H + L_e \quad (2.12)$$

onde, R_n é o saldo de radiação para a superfície e G é o fluxo de calor no solo. Geralmente, a convenção de sinal utilizada é R_n positiva do ar para a superfície e G , H , e L_e positivos da superfície para o ar. Substituindo L_e β por H na equação 2.12 e solucionando para L_e resulta:

$$L_e = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2.13)$$

A densidade de fluxo de calor latente, L_c , é a parte da energia utilizada na ET_c . O método requer medições de R_n , G , T e “e” a duas alturas acima da superfície evaporante para a determinação dos fluxos L_c e H .

A pressão atmosférica (p), também, é necessária, mas raramente varia muito, e deve ser calculada de acordo com a elevação local, assumindo uma atmosfera padrão.

A sensibilidade de β é diretamente relacionada aos gradientes de temperatura e de pressão de vapor medidos (equação 2.11). Isso significa que um erro de 1 % nas medições resulta em 1 % de erro em β . Os fluxos (H e L_c) calculados aproximam do valor infinito quando o valor de β aproxima de -1. Essa situação geralmente ocorre somente a noite quando há pouca energia disponível ($R_n - G$). Na prática, quando o valor de β esta muito próximo de -1 ($-1,25 < \beta < -0,75$), os valores de H e L_c são considerados negligíveis e não são calculados.

As condições hídricas da superfície evaporante é que vai definir os valores de β . Após uma aplicação de água, irrigação ou chuva, essa superfície vai estar bem umedecida e uma maior parte de R_n vai ser usada em L_c , resultando em valores baixos de β . Caso contrário, em uma condição de estresse hídrico, essa superfície vai apresentar restrição hídrica e uma maior parte de R_n vai ser utilizada no aquecimento do ar (H), fornecendo valores elevados de β .

Uma das formas de se medir a concentração de vapor é utilizando um higrômetro de ponto de orvalho “cooled mirror” (General Eastern Corp., modelo DEW-10) por meio de uma técnica desenvolvida para estudos de gradiente em múltiplo níveis (LEMON, 1960). Amostras de ar coletadas de duas alturas são direcionadas aos “cooled mirror” após passarem através de um processo de mistura de volumes. Uma simples bomba de baixa potência é responsável pela coleta do ar por aspiração (Figura 2.5). Com relação as alturas, é comum realizar as duas amostragens, uma logo acima do dossel da cultura (em torno de 0,1 m) e outra distanciada verticalmente de cerca de 1,5 m da primeira (Figura 2.6). Para ajustar e fazer coincidir as taxas de fluxo de ar, rotômetros, manualmente ajustáveis, estão posicionados nos dois (ou três) braços de amostragens (Figura 2.5). Uma taxa de fluxo de $0,4 \text{ L min}^{-1}$ com câmaras de mistura de 2 L fornece uma constante de tempo de 5 min. Um datalogger é usado para medir todos os sensores e controlar a abertura e o fechamento das chaves eletrônicas das válvulas reguladoras de fluxo de ar através do “cooled mirror” (Figura 2.5). A resolução de medição da temperatura do ponto de orvalho é de $\pm 0,003 \text{ }^\circ\text{C}$ para uma faixa de temperatura de $\pm 35 \text{ }^\circ\text{C}$. O higrômetro de ponto de orvalho (Dew-10) apresenta uma estabilidade de aproximadamente $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$, fornecendo uma

resolução para pressão de vapor melhor do que $\pm 0,01$ KPa para uma ampla condição de variação de meio ambiente.

A cada intervalo de 2 min o ar que esta sendo puxado através do “cooled mirror” é mudado de uma altura para a outra, devido ao controle das chaves eletrônicas. A cada ciclo de 2 min, o tempo admitido para que o “mirror” estabilize no novo ponto de orvalho é de 40 s e o tempo de duração de medições para um nível individual é de 1 min e 20 s. A temperatura do ponto de orvalho é medida a cada segundo e a pressão de vapor é calculada pelo datalogger usando a equação descrita por LOWE (1976). A média de pressão de vapor é calculada a cada 20 min para cada altura.

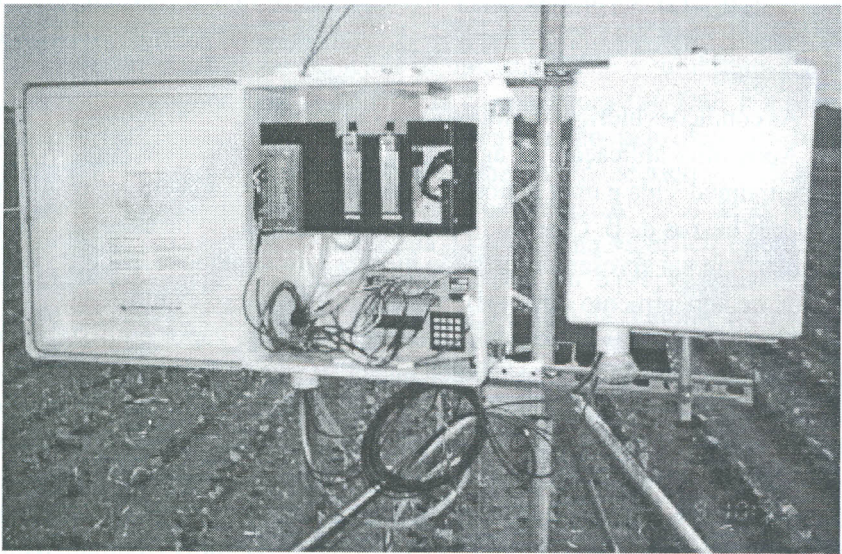


Figura 2.5. Abrigo de proteção do datalogger, do sistema automático controlador do fluxo de ar e do sensor da concentração de vapor do ar. Ao lado, fechado, abrigo da bateria (EMBRAPA Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG).

A temperatura do ar é medida à duas alturas, em posições bem próximas das amostragens do ar (Figura 2.6), com termopares de cromo-constantan. O diferencial de voltagem gerado é devido a diferença de temperatura entre os dois níveis T_1 e T_2 . Nesse caso, não existe erro de “offset” inerente aos sensores. A resolução do datalogger é de $0,006$ °C com um ruído de $0,1$ μ V rms.

Os dois braços dos sensores de temperatura e pressão de vapor do ar, o abrigo de proteção do datalogger, bateria, sistema automático controlador do

fluxo de ar e sensor da concentração de vapor do ar e o painel solar são todos montados em um único tripé (Figura 2.6). Um braço transversal com os sensores para medir a velocidade e a direção do vento é montado no topo do tripé (Figura 2.6).

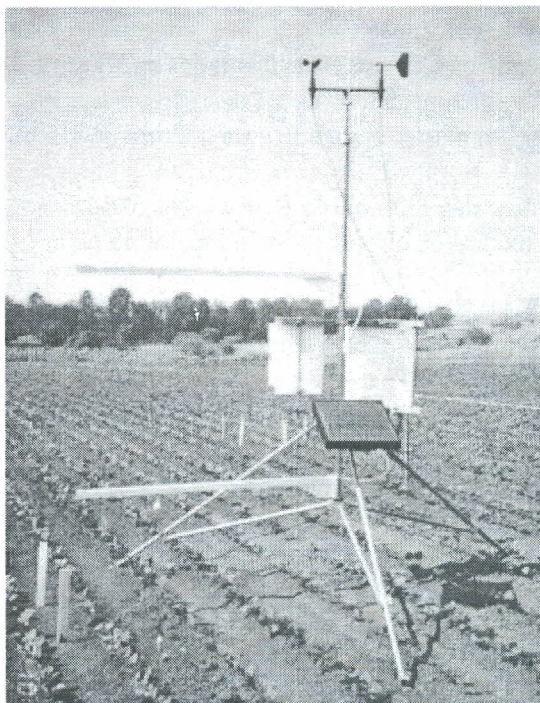


Figura 2.6. Sistema razão de Bowen com sensores de temperatura do ar e pontos de aspiração do ar (pressão de vapor), saldo de radiação, temperatura e fluxo de calor no solo, velocidade e direção do vento, abrigos de proteção e painel solar instalado sobre a cultura do feijoeiro (EMBRAPA Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG).

O saldo de radiação (R_n) é medido com o mesmo sensor descrito anteriormente no item estações meteorológicas automáticas. A temperatura e o fluxo de calor no solo (G) são medidos com termopares de cromo-constantan. A temperatura média do solo é proveniente de quatro termopares montados juntos em paralelo (Figura 2.7), de tal forma que de dois em dois fornecem a temperatura média da camada de solo acima dos dois sensores de fluxo de calor no solo. O local para instalação desses sensores deve ser representativo

da área em estudo. Nesse local, procede-se então a abertura de uma pequena trincheira com o auxílio de uma pá, tendo-se o cuidado de manter o solo retirado intacto nas imediações. Os sensores são instalados, com o auxílio de uma faca, em uma das paredes da trincheira, onde o solo não está deformado. Desta forma, mais tarde, a trincheira do local de instalação pode ter o seu solo repostado, procurando sempre alterar o mínimo a estrutura natural do solo. As profundidades de colocação dos sensores, em relação a superfície do solo, e o espaçamento entre os sensores estão ilustrados na Figura 2.7, onde é apresentado um esquema de uma instalação típica desses sensores no solo. O sensor da R_n é instalado em um mastro separado a uma altura de 1,5 m acima do dossel da cultura.

As médias das leituras de R_n e G são obtidas no mesmo período de tempo que as médias de diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor do ar.

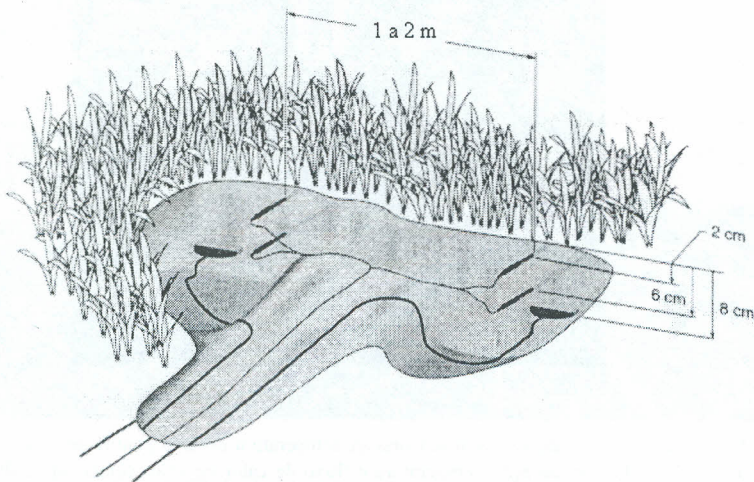


Figura 2.7. Ilustração da instalação dos termopares de temperatura do solo e das placas de medição do fluxo de calor no solo (CAMPBELL SCIENTIFIC, 1995).

Correlação de Turbilhões

A camada da superfície (Figura 2.8) corresponde aproximadamente a 10% da camada inferior da camada limite atmosférica (CLA). Os fluxos de vapor de água e de calor dentro dessa camada é quase constante com altura

quando são satisfeitos os seguintes pressupostos básicos: a superfície tem homogeneidade horizontal suficientemente grande; a relação $z/h \ll 1 \ll z/z_{om}$ é verdadeira na camada da superfície, h é a altura da *CLA*, e z_{om} é o parâmetro de rugosidade para transporte de momentum. Quando as condições anteriores são atendidas, o fluxo de vapor de água e de calor, dentro da *CLA*, pode ser escrito como:

$$LE = L_v \overline{w' \rho'_v} \quad (2.14)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w' T'} \quad (2.15)$$

em que LE é o fluxo de calor latente, L_v é o calor latente de evaporação, w' é o desvio instantâneo da velocidade vertical do vento em relação ao escoamento médio, ρ'_v é o desvio instantâneo da densidade de vapor de água em relação à média, H é o fluxo de calor sensível, ρ_a é a densidade do ar, C_p é o calor específico do ar seco à pressão constante, e T' é o desvio instantâneo da temperatura do ar em relação à média.

As quantidades $\overline{w' T'}$ e $\overline{w' \rho'_v}$ são as covariâncias entre a velocidade do vento vertical e a temperatura, e entre a velocidade do vento vertical e a densidade do vapor d'água, respectivamente. Essas quantidades podem ser registradas e calculadas em tempo real com o datalogger.

Num escoamento turbulento, em função da movimentação dos turbilhões, as propriedades atmosféricas variam a cada instante. Nesse período (Δt), obtém-se uma velocidade média (\bar{u}), que é dada pela expressão,

$$\bar{u} = (\Delta t)^{-1} \int_{t_i}^{t_f} u dt \quad (2.16)$$



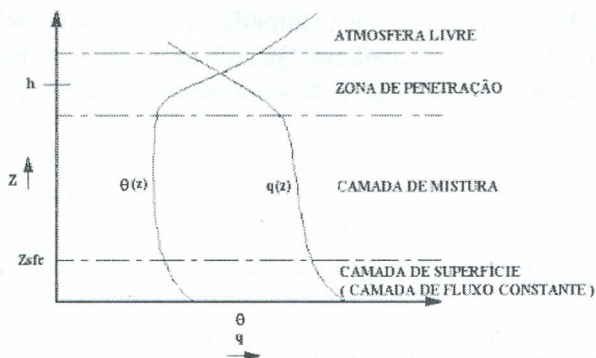


Figura 2.8. Estratificação teórica da camada limite atmosférica e perfis verticais de temperatura potencial virtual (θ) e de umidade específica (q) que descrevem todas as sub-camadas.

Portanto, num dado instante, a velocidade horizontal do vento (u) é dada por:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.17)$$

em que u' representa o desvio da velocidade horizontal do vento médio, sendo também chamado de perturbação ou flutuação. Desse modo, o escoamento é composto por um *escoamento médio* sobreposto por um *escoamento turbulento*. Essa maneira de representar o escoamento dá origem à teoria da perturbação, sendo também conhecida como *notação de Reynolds*.

De fato, a teoria de Reynolds é amplamente utilizada. Esta aproximação está baseada em duas suposições explícitas. O primeiro é a existência de alguma escala que separa as macro características (média do campo de velocidade) da estrutura de microescala. A segunda suposição é que é possível construir equações corretas de fechamento, isto é, as equações que tensões de Reynolds podem ser expressas por meio do campo de escoamento médio calculado.

No caso de medições da evapotranspiração, os desvios dos turbilhões, no escoamento turbulento, transportam certa concentração de vapor d'água na camada limite da superfície. Um desvio no turbilhão de movimento ascendente ($+w'$) vai de um nível de maior concentração de vapor d'água para outro de menor; logo, há transporte de vapor d'água da camada próxima à superfície para os níveis superiores. Este método só é aplicável com instrumental sofisticado, sendo justificado apenas em projetos de pesquisa, pois necessita de medidas das flutuações instantâneas das propriedades atmosféricas.

Na camada limite da superfície a velocidade vertical do vento

médio pode ser considerado zero, uma vez que os turbilhões têm movimentos aleatórios e teoricamente isotrópicos, isto é, têm deslocamentos iguais, tanto para cima como para baixo, e o escoamento médio na vertical igual a zero. Portanto, a densidade média de fluxo turbulento é dada principalmente pela média do produto das flutuações da velocidade vertical do vento (w') e da propriedade atmosférica (P') que está sendo transportada, no caso a umidade específica (q).

O princípio do método de correlação de turbilhões é medir as contribuições de todos os movimentos turbulentos responsáveis pela transferências verticais de vapor de água, calor sensível e momentum. Para isso requer amostragens dos sinais turbulentos a uma alta taxa de resposta (tipicamente 10-20 Hz) e calcular as covariâncias médias para um período longo de tempo (tipicamente 15-30 min). Ambas as escalas de tempo devem ser determinadas de considerações espectrais.

Descrição do Sistema

O sensor de referência para velocidade de vento é o anemômetro sônico. Esse sensor é constituído de um a três pares de transdutores acústicos que medem o tempo de trânsito das pulsações acústicas em um intervalo de percurso. Sabendo-se a velocidade do som em um ambiente estacionário e em repouso, o componente de velocidade do vento ao longo deste percurso ou caminho é então facilmente calculado. Os três sensores medem as flutuações de velocidade vertical do vento, temperatura do ar, e densidade do vapor de água (Figura 2.9). Os sensores tem comprimento de percurso 10 cm, frequência de resposta de 40 Hz e termopares de fio muito fino com uma frequência de resposta maior que 30Hz. O pequeno tamanho e um *design* de montagem de junções simétricas dos termopares minimizam a carga de radiação e, dessa forma, não há necessidade de proteção dos sensores contra a radiação solar.

Alguns sensores são baseados nos higrômetros de criptônio ultravioleta (*krypton ultraviolet*), que tem um princípio de funcionamento semelhante ao higrômetro de *Lyman-alfa*, com a diferença de que o tubo contém gás de criptônio e resposta de frequência de 100Hz são utilizados conjuntamente com os sensores de vento. Devem ser medidas a temperatura do ar ambiente e umidade. Esta informação é usada para fazer as correções das medidas de vapor de água e calcular a densidade do ar.

A maioria dos higrômetros de resposta rápida está baseado em princípio da física óptica. A radiação é enviada de uma fonte para um detetor ao longo

de um caminho óptico, dentro de uma faixa espectral onde é em parte absorvido através do vapor de água. A faixa espectral é no ultravioleta (higrômetro *Lyman-alfa* e higrômetro de criptônio) ou no infravermelho (tipicamente $2,6 \mu\text{m}$). No último caso, dois dispositivos são usados: sensor de caminho aberto, que executam medidas in-situ e sistemas de caminho fechado onde o ar é aspirado e é enviado por um tubo a um analisador a infravermelho.

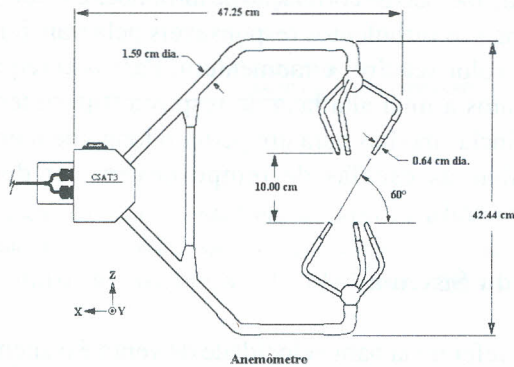


Figura 2.9. Esquema de três anemômetros sônicos com termopares de fio fino (CAMPBELL SCIENTIFIC, Inc., 1997).

Técnicas de micrometeorológica de correlação de turbilhões, associadas com a técnica da razão de Bowen, são utilizadas também para determinar os fluxos de calor sensível, calor latente e gás carbônico. Todavia, o método da correlação de turbilhões é uma técnica já bem estabelecida que tem a vantagem primária de medir fluxos difusivos turbulentos diretamente sobre superfície plana. Requer uma plataforma rígida sem obstruções de obstáculos aerodinâmicos significantes. São computados os fluxos de calor sensível e latente como covariâncias de flutuações de velocidade de vento vertical com flutuações de temperatura e densidade de vapor no instante no mesmo ponto.

Os sensores de covariância de turbilhões são montados a certa altura de tal forma que garanta as medições no interior da camada limite da superfície. A camada limite da superfície local cresce a uma taxa aproximada de um metro em altura para 100 metros em distância horizontal. Portanto, como regra geral uma relação entre a altura do sensor com o tamanho da bordadura (distância

horizontal percorrida pelo vento) deve ser de 1:100. Considere-se, por exemplo, dois campos adjacentes, o primeiro plantado com milho com 1,0 m de altura e o segundo com soja com 0,5 m de altura. O sensor de correlação de turbilhões instalado a 2,0 m acima da cultura do milho deve ter uma bordadura mínima de 200 m em todas as direções, principalmente entre o sensor de correlação de turbilhões e a interface entre o campo cultivado de milho e soja.

Os sensores de vento devem ser montados perpendicularmente à superfície. Isto é feito de modo que nenhum componente horizontal do vento será medido. O higrômetro deve ser fixado na parte traseira dos anemômetros sônicos para minimizar distorções de fluxos. Deve-se tentar manter os tubos dos higrômetros o mais distante possível dos termopares de fio fino, para evitar medições de flutuações de temperatura causadas pela carga de radiação nos tubos dos higrômetro.

Alguns modelos de anemômetros sônicos os transdutores não tem celamento de proteção contra chuvas e o elemento sensível pode ser danificado pelo molhamento contínuo. Nesses equipamentos os transdutores devem ser protegidos tanto da chuva como também dos sistemas de irrigação. Além disso, as junções dos fios finos, que constituem os termopares, são extremamente frágeis e, portanto, devem ser manuseados com muito cuidado.

Nos últimos dez anos o método da correlação de turbilhões transformou-se na técnica padrão de medida da evapotranspiração na escala de dossel das plantas, especialmente em trabalhos de pesquisas. Essa técnica proporciona medidas diretas de fluxos, sem suposição particular para difusividade turbulenta, para a forma do perfil de vento ou a influência de forças de flutuações. Consiste em expressar a densidade de fluxo como a covariância entre flutuações na velocidade vertical e concentração de vapor, para um certo período de tempo. Essa técnica requer sensores com um tempo de resposta da ordem de uma fração de segundos.

Um aspecto importante a considerar é o fato de que a série de tempo deve ser estacionária na escala do período em que a média é calculada, que pode requerer algum tipo de filtragem dos sinais turbulentos originais (filtragem linear ou filtragem mais complexa). Outros aspectos importantes devem ser conhecidos pelo pesquisador: correções de densidade, que são proporcionais ao fluxo de calor sensível e pode ser bastante grande para as razões de Bowen elevadas; orientação do sensor de velocidade do vento; efeitos da distorção do escoamento; geometria do sistema (separação de espaço entre o anemômetro sônico e o higrômetro).

Em geral, qualquer método de transferência de massa requer instrumentação complexa e pessoal especializado e bem treinado para se obterem

resultados precisos ou satisfatórios. Todavia, a instrumentação comercial está disponível para aplicações sofisticadas para atender, principalmente, a teoria de fluxo de turbilhões. Esses instrumentos, quando utilizados em conjunto com microprocessadores e sistemas automáticos de aquisição de dados, podem facilitar a utilização do método para medições de rotina no campo.

A pressuposição natural para o estudo da turbulência é que existe alguma (desconhecido ainda) propriedade geral universal para uma ampla gama de escoamentos turbulentos. A procura por tais propriedades é um dos objetivos principais da pesquisa moderna nessa área de pesquisa. A idéia das investigações recentes é a procura de tal universalidade baseada em conjuntos de dados obtidos de diferentes fontes. Isto permite evitar características espúrias, que podem surgir por causa da tecnologia da observação, e extrair mais claramente as propriedades gerais da turbulência.

As simulações numéricas têm as suas próprias dificuldades e limitações, como a largamente conhecida viscosidade artificial e muitos outros. Tecnicamente, muitas série de tempo obtidas de turbulência atmosférica natural e para as simulações numéricas diretas de dois diferentes escoamentos tem sido processado usando técnica de duplo desvios de momentum, com a mesma tecnologia de processamento.

2.4 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS DE MEDIÇÃO NA PLANTA

Microondas

A utilização de radiômetros de microondas na agricultura tem sido mais voltada para a medição do conteúdo de água no solo. No entanto, estudos mais recentes têm demonstrados as formas de relação entre a emissão de microondas e o conteúdo de água da planta e também o crescimento vegetativo da planta (PAMPALONI & PALOSCIA, 1986; PALOSCIA & PAMPALONI, 1987). Também, a emissão de microondas pode ser usada na caracterização das condições de estresse hídrico das plantas de duas maneiras: um método indireto que utiliza a emissão de microondas para medir a pressão de vapor do ar no topo da vegetação e um método direto que leva em consideração as vantagens de uma forma de relação experimental estabelecida entre o índice de polarização e o índice de estresse hídrico da cultura (PALOSCIA & PAMPALONI, 1984). Esses métodos já foram testados com as culturas de milho e trigo. No entanto, as medições com microondas não são usadas muito freqüentemente para obter informação a respeito do status hídrico e crescimento das plantas por causa do

tamanho físico e da complexidade do equipamento necessário.

Diâmetro do Caule

Medições de diâmetro do caule são usadas para registrar continuamente o crescimento do caule e o status hídrico da planta, uma vez que estudos comprovam a existência de uma estreita relação entre o diâmetro do caule e o potencial de água das folhas, Ψ_L (KLEPPER et al., 1971). HUCK & KLEPPER (1977) apresentam a descrição de dois métodos que utilizam o diâmetro do caule para estimar a variação diurna do potencial de água do xilema. O primeiro, conhecido como “Método do Módulo de Contração”, consiste em determinar por meio de calibração um módulo de contração arbitrário e relacionar uma mudança medida de diâmetro do caule a uma diferença em Ψ_L correspondente. O segundo, denominado de “Método do Fluxo Dinâmico”, baseia-se na simulação do fluxo de água entre o xilema e os tecidos de parênquima do floema resultante de mudanças em potencial de água na planta. Nesse caso, atribui-se que as diferenças de potencial de água entre o xilema e os tecidos da circunvizinhança (floema) induzem um fluxo radial de água através da camada cambial limite provocando a dilatação ou contração do caule.

Um equipamento transformador diferencial linear variável pode ser usado para medir as mudanças de diâmetro do caule das plantas (PARSONS et al., 1979). O diâmetro do caule usado como referencia para calcular a mudança de diâmetro do caule é medido antes do sol nascer.

A relação entre as mudanças de diâmetro do caule e o valor mínimo de Ψ_L é linear. Essa técnica de medição pode ser usada por controle de retroalimentação de sistemas de irrigação automáticos (PHENE et al., 1989). Calibração periódica de mudanças de diâmetro do caule versus Ψ_L devem ser obtidas, pelo menos para cada estágio fenológico das plantas. Os valores limites de Ψ_L para o caso de plantas não estressadas são ajustados de acordo com o estágio fenológico e requerimentos de água da cultura.

Dissipação Térmica

Os métodos de dissipação térmica são usados para medições, de forma rápida e acurada, de fluxo de fluido em meios porosos, onde uma fonte de calor contínua ou um pulso direcionado de calor é produzido por meio de dispositivos termoeletrônicos. Nesse caso, tanto a fonte como o pulso de calor atuam como indicadores para detectar a taxa de fluxo. Diferentes meios porosos têm sido

motivo de trabalhos. No entanto, os métodos de dissipação térmica têm sido bastante usados para medir o fluxo de seiva (água) através do sistema vascular, conjunto de vasos do xilema, nos caules de diferentes espécies de plantas. Os trabalhos têm sido conduzidos com o propósito de investigar a taxa de transpiração das plantas. A grande maioria desses trabalhos considera uma condição de estado de equilíbrio térmico, seguindo a aplicação do calor na forma de pulso (MARSHALL, 1958; COHEN et al., 1981 e 1988; EDWARDS & WARWICK, 1984), de um aquecimento contínuo (CERMAK, 1976) ou de um balanço de calor (PICKARD, 1973; SAKURATANI, 1981, 1982, 1984 e 1985). Todos requerem o conhecimento das propriedades térmicas da madeira úmida, isto é, calor específico, condutividade térmica e densidade.

Pulso de Calor

O método do pulso de calor é usado em manejo de irrigação, principalmente em regiões áridas, onde o recurso hídrico é limitado, devido ao fato de permitir o monitoramento da taxa de transpiração das plantas, possibilitando uma maior eficiência de utilização da água. O método do pulso de calor tem sido usado como padrão na aferição e calibração de outros métodos de estimativa da ETc. A instrumentação usada é portátil, possibilitando medições em mais de uma planta. É muito fácil proceder a movimentação do sistema para qualquer ponto da área irrigada. O sistema de aquisição de dados e controle dos sensores é totalmente automático. Isso facilita bastante o seu emprego na automação de sistemas agrícolas irrigados.

Uma instrumentação foi desenvolvida para o método do pulso de calor que é bastante usada no caule de plantas lenhosas e herbáceas (COHEN et al., 1988). O sistema consiste de um conjunto de três sondas montadas em um único bloco (Figura 2.10). A sonda do meio é usada como elemento para aplicar o pulso de calor em linha e é uma agulha hipodérmica de 0,55 mm de diâmetro externo e 18 mm de comprimento. As outras duas sondas, montadas à 9 mm acima e 4 mm abaixo em relação a sonda do meio, são utilizadas para medir a temperatura no caule com termopares de cobre-constantan que são inseridos no interior de agulhas hipodérmicas de 0,55 mm de diâmetro externo e 15 mm de comprimento (Figura 2.10). As junções dos termopares são cobertas com uma camada fina de epoxy visando evitar o contato direto com os corpos das agulhas e também remover o ar das agulhas. As duas agulhas hipodérmicas com os termopares são radialmente inseridas no caule da planta, até a região onde estão o conjunto de vasos do xilema. Geralmente, um pulso de calor de 0,3 s de duração é aplicado antes de cada medição e a diferença de temperatura

entre os termopares situados acima e abaixo da sonda de calor é registrada a intervalos de 0,3 s por meio de um datalogger. O tempo necessário para que esse diferencial de temperatura retorne as condições de equilíbrio é então detectado (Figura 2.11).

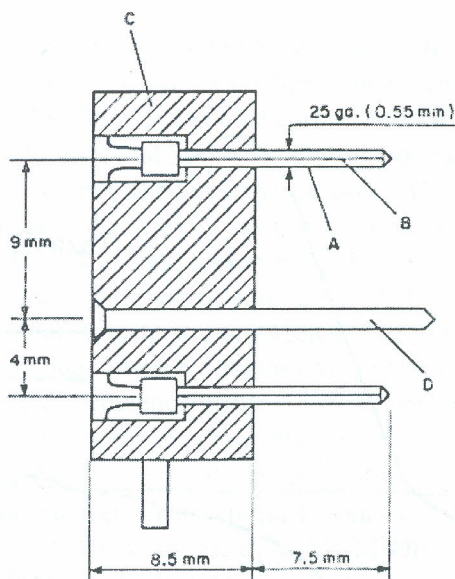


Figura 2.10. Conjunto de três sondas montadas em um único bloco para medir a taxa de transpiração no caule de plantas pelo método de pulso de calor (COHEN et al., 1988).

Sonda de Calor Transiente

Apesar do grande número de trabalhos utilizando os métodos de dissipação térmica para medições de fluxo de fluido em meios porosos, ainda não tem sido encontrado uma maneira de se estudar o fluxo de fluido para uma condição transiente de transferência de calor. Para isso, uma sonda de calor transiente controlada por computador foi desenvolvida para medir fluxo de fluido em meios porosos (GOMIDE, 1990; GOMIDE et al., 1992). A sonda é alternadamente comutada entre dois módulos de operação, alta e baixa potência (aquecimento e resfriamento, respectivamente). A operação do sistema requer a inserção radial da sonda no meio poroso. Para efetuar uma medida, um breve pulso de calor é produzido (tipicamente de 3 a 5 s). Esse calor é dissipado por condução

e convecção, devido ao movimento do fluido. A mesma sonda é usada como fonte de calor e sensor de temperatura.

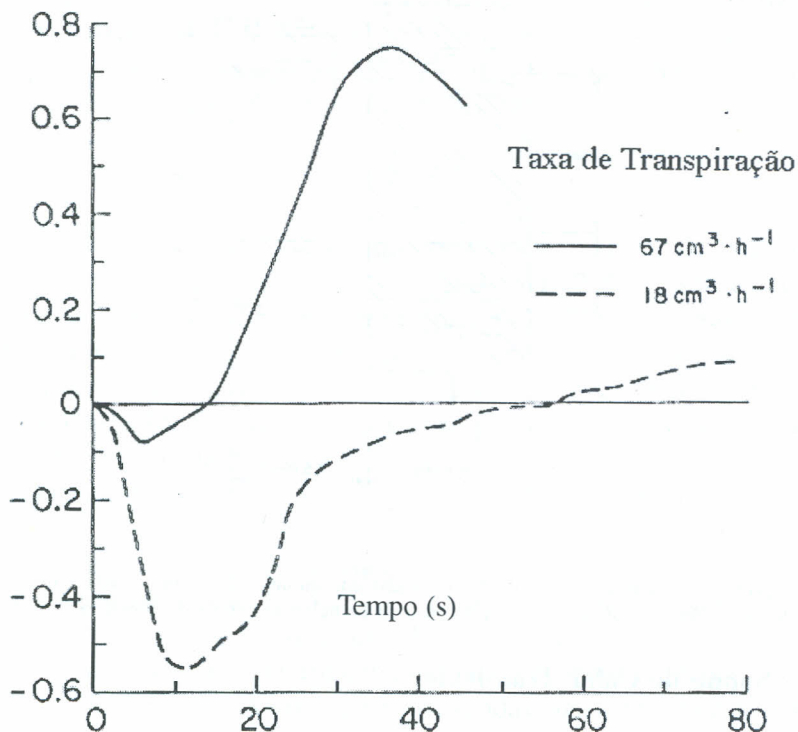


Figura 2.11. Diferença de temperatura registrada entre os dois termopares no caule de um algodoeiro em função do tempo, seguindo a aplicação de um pulso de calor de 0,3 s para duas taxas de transpiração (COHEN et al., 1988).

Descrição e Avaliação do Sistema

A queda de temperatura com o tempo é o sinal detectado após a aplicação do pulso de calor. O processamento do sinal tem que permitir medições de pequenas

mudanças de temperatura, uma vez que o resfriamento da sonda aquecida esta associada ao fluxo de fluido. Desta forma, a coleta de dados é baseada no monitoramento da queda de temperatura da sonda com o tempo, a partir do final da aplicação do pulso de calor. Devido a isto, o nível de ruído tem que ser baixo para permitir medições confiáveis dentro de pequenos incrementos de tempo.

O sistema é operado automaticamente e consiste de um computador em forma de uma única placa, um sensor do tipo sonda-termistor (encapsulado com vidro de $1\text{ K}\Omega$ à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), uma fonte de corrente elétrica constante de dois níveis, um conversor de sinal analógico para digital, um transistor de efeito de campo e um conjunto de amplificadores operacionais. O computador é usado para a aquisição automática dos dados e processar os programas de inicialização e configuração dos módulos Data e Horário e das portas de interface dos periferais. Um programa foi desenvolvido, em BASIC-52, para controlar o circuito elétrico e coletar, transferir e armazenar os dados. Os componentes elétricos, incluindo a sonda, foram montados em um "protoboard". Para obter os módulos de operação de autoaquecimento e resfriamento, a sonda foi excitada com uma corrente constante, por meio de duas resistências retroalimentáveis ($6,4$ e $640\ \Omega$), um transistor de efeito de campo (usado como chave eletrônica de alta velocidade) e um sinal enviado da porta de controle (C5) do chaveamento. A Figura 2.12 ilustra o sistema em operação. GOMIDE (1990) fornece uma descrição detalhada de toda a instrumentação, do diagrama do circuito elétrico e do programa fonte.

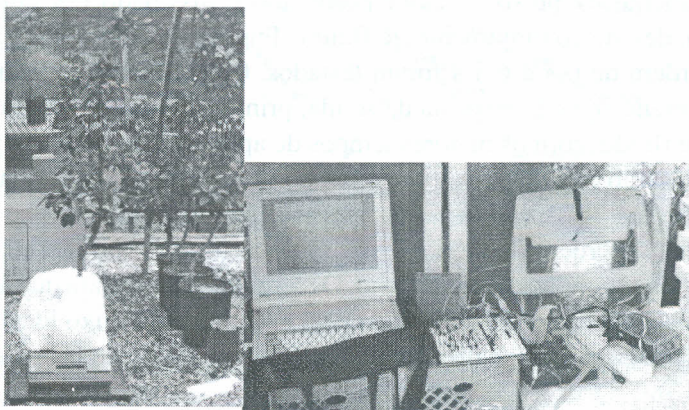


Figura 2.12. Sonda de calor transiente, controlada por computador, monitorando o fluxo de seiva no caule de uma macieira e minilímetro de pesagem determinando a taxa de transpiração da planta (GOMIDE, 1990).

O sistema foi avaliado em dois diferentes meios porosos: uma câmara cilíndrica, de acrílico transparente, preenchida com pequenas esferas de vidro (355 a 420 μm de diâmetro), onde a sonda foi inserida radialmente até o seu centro; e um conjunto de vasos do xilema de um caule lenhoso de uma planta, onde procedeu-se a inserção radial da sonda. As taxas de fluxo de fluido através da câmara (água destilada) e da planta (seiva, macieiras de 18 meses) foram obtidas com um método volumétrico direto e um minilísímetro de pesagem (transpiração), respectivamente. Durante os testes, realizaram-se medições simultâneas da resposta térmica transiente da sonda e das taxas de fluxo do fluido (água e seiva). A mesma sonda foi usada como fonte de calor e sensor de temperatura. O sinal detectado após a aplicação do pulso de calor foi a queda de temperatura com o tempo (resfriamento). O efeito da taxa de fluxo do fluido sobre a resposta da sonda foi estudado por meio da seguinte relação adimensional:

$$S_f = \frac{T - T_f}{T_i - T_f} \quad (2.18)$$

onde, S_f é a resposta térmica da sonda, T representa a temperatura da sonda no tempo "t", T_f é a temperatura do fluido no meio poroso antes da aplicação do pulso de calor, e T_i é a temperatura inicial no tempo zero ($t=0$), início da fase de resfriamento (a temperatura mais alta da sonda).

A sonda apresentou uma dissipação de potência da ordem de 10^{-1} e 10^{-5} W durante os módulos de operação de autoaquecimento e resfriamento, respectivamente. O pulso de calor produzido é dissipado por condução e convecção, devido ao movimento do fluido. Tempos de aplicação de pulso de calor da ordem de 0,3 a 6,5 s foram testados. Os resultados indicaram uma melhor diferenciação da resposta da sonda, principalmente das maiores taxas de fluxo de fluido, com os maiores tempos de aplicação do pulso. O principal efeito da duração do pulso foi sobre o tempo necessário para a sonda retornar às condições de T_f . A resolução do sistema permitiu detectar variações de temperaturas da ordem de 0,06 $^{\circ}\text{C}$, em intervalos de tempo de 0,030 s, nas proximidades da condição de equilíbrio. Os resultados indicaram que a resposta térmica transiente da sonda foi afetada pela magnitude do fluxo local e que os dados não poderiam ser analisados por meio de modelos de primeira ordem (Figura 2.13).

Balço de Energia no Caule

O método do balanço de energia é usado para medições da taxa de fluxo de seiva no caule de plantas e é baseado, como o próprio nome já indica, na aplicação do balanço de energia a um segmento do caule, que é aquecido por uma resistência eléctrica envoltória (SAKURATANI, 1981 e 1984). Desta forma, nenhum distúrbio é causado ao caule da planta, que permanece intacto. Quando uma quantidade de calor, Q (W), é suprida continuamente, a uma taxa constante, a esse segmento de caule, o balanço de energia em condições de equilíbrio térmico é dado por (Figura 2.14):

$$Q = Q_f + q_u + q_d + q_s \quad (2.19)$$

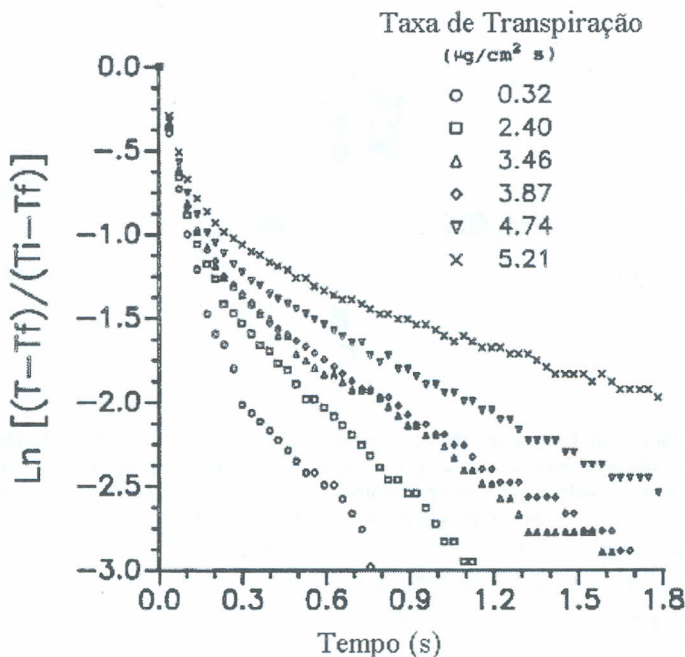


Figura 2.13. Resposta térmica transiente da sonda, instalada no caule de uma macieira, a diferentes taxa de transpiração da planta após a aplicação de um pulso de calor de 4,8 s (GOMIDE et al., 1992).

onde, Q_f (W) é a energia dissipada devido ao fluxo de massa de seiva (água), q_u e q_d (ambos em W) representam a energia dissipada abaixo e acima do volume de controle (segmento de caule) devido à condução térmica ao longo do caule da planta e q_s (W) é a energia dissipada da superfície do volume de controle aquecida para o ar ao redor do caule por meio de convecção. O equipamento utilizado nas medições consiste essencialmente de uma sonda flexível e ajustável, que abraça ao caule. Nessa sonda, a resistência elétrica de aquecimento (jaqueta térmica) e os sensores de medição de fluxo de calor e de temperatura encontram-se montados em um único bloco (Figura 2.15). A jaqueta térmica fornece uma taxa constante de calor ao segmento do caule. Os sensores de fluxo de calor e temperatura são termopares de cobre-constantan e são usados para detectar as perdas de calor da superfície da jaqueta térmica para o ar ao redor do caule e as diferenças de temperatura no caule, respectivamente.

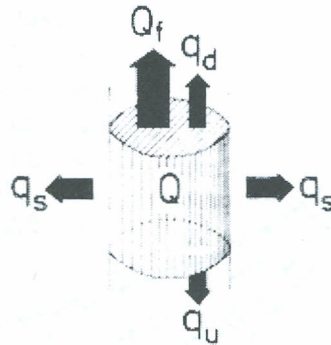


Figura 2.14. Balanço de energia em um segmento de caule (Q é a fonte de calor aplicada, Q_f é a energia dissipada pelo fluxo de massa, q_u e q_d representam a energia dissipada pela condução térmica ao longo do caule e q_s é a energia dissipada por convecção da superfície do volume de controle para o ar, SAKURATANI, 1981).

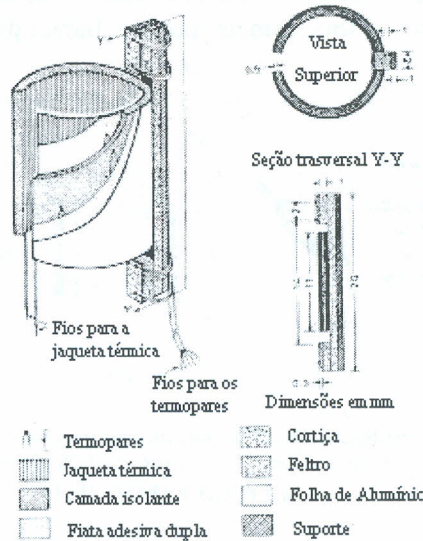


Figura 2.15. Sonda flexível e ajustável ao caule da planta para medições da taxa de fluxo de seiva pelo método do balanço de energia (SAKURATANI, 1984).

A taxa de fluxo de seiva no caule da planta é determinada pela seguinte equação (SAKURATANI, 1984):

$$F = \frac{Q - kA \frac{(T_u - T_u') + (T_d - T_d')}{\Delta x} - KE}{c(T_d - T_u)} \quad (2.20)$$

em que, F é a taxa de fluxo de seiva (g s^{-1}), Q é a quantidade de calor suprida ao segmento de caule (W), T_u e T_d são as temperaturas do caule nos limites inferior e superior do segmento aquecido, respectivamente ($^{\circ}\text{C}$), T_u' é a temperatura do caule a uma distância Δx (m) abaixo do ponto de medida de T_u ($^{\circ}\text{C}$), T_d' é a temperatura do caule a uma distância Δx (m) acima do ponto de medida de T_d ($^{\circ}\text{C}$), K é uma constante ($W v^{-1}$), E é a força eletromotriz (v) do elemento sensor de fluxo de calor preso ao segmento aquecido, k é a condutividade térmica do caule ($Wm^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$), A é a área da seção transversal do segmento de caule aquecido (m^2) e c é o calor específico da seiva ($J g^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$) (Figura 2.16).

O balanço de energia é um método que tem sido usado com sucesso para estudar os efeitos de fatores ambientais sobre o fluxo de seiva em caules de várias culturas como a soja, tomate, pepino, batata doce, cana de açúcar, limão e milho.

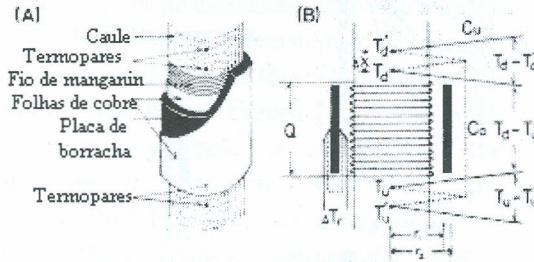


Figura 2.16. Montagem da resistência elétrica de aquecimento (jaqueta térmica) e dos sensores de medição de fluxo de calor e de temperatura na sonda para medição de taxa de fluxo de seiva no caule da planta (SAKURATANI, 1981).

Termometria ao Infravermelho

Embora temperaturas de folhas tenham sido determinadas por mais de 100 anos, somente a partir dos anos 70 a determinação da temperatura da cobertura vegetal tornou-se rotina. Isto foi resultado do desenvolvimento de termômetros ao infravermelho portáteis, que determinam a radiação emitida de todas as partes da cobertura vegetal sob o campo visual do instrumento. Nos anos 80 a tecnologia que utiliza termômetros ao infravermelho avançou rapidamente, e instrumentos que puderam ser utilizados no campo tornaram-se disponíveis. Os instrumentos evoluíram desde os que exigiam energia externa fornecida por cabos até os portáteis com baterias. A termometria ao infravermelho é portanto um método remoto de estimativa da temperatura de um objeto, determinando a radiação emitida pelo mesmo.

O avanço da tecnologia para a determinação da temperatura da cobertura vegetal possibilitou a comprovação de sua adequabilidade na detecção do estresse hídrico, e mesmo na estimativa da evapotranspiração, apesar de existirem ainda muitos pontos de discussão.

Princípio da Técnica da Termometria ao Infravermelho

A temperatura de uma cobertura vegetal é o resultado da interação entre

esta e a energia radiante que atinge o sistema. A radiação que chega se divide em diversas partes, provocando processos evaporativos (fluxo de calor latente) e aquecimento do ar e do solo (fluxos de calor sensível), além de participar de outros processo, como a fotossíntese. Desta forma, uma cobertura vegetal tem sua temperatura determinada pelo balanço de energia entre sua superfície e a camada de ar logo acima.

Sendo uma resposta às trocas de energia, a temperatura da superfície da cobertura vegetal pode ser expressa em termos da radiação por ela emitida. Segundo a lei de Stefan-Boltzmann, a energia emitida por um corpo qualquer é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta de sua superfície:

$$\text{Rad} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.21)$$

Em que a Rad é a radiação emitida por um corpo (W m^{-2}); ε é a emissividade da superfície do corpo; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$) = $5,674 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$; T é a temperatura do corpo considerado (K). Assim, conhecendo-se o fluxo de radiação emitido pela superfície do corpo pode-se determinar sua temperatura.

Fatores que Influenciam na Detecção da Temperatura Radiante da Cobertura Vegetal

Vários são os fatores que têm influência sobre a detecção da temperatura radiante de uma superfície, e que devem ser observados quando em sua utilização em pesquisas ou mesmo em sua aplicação prática. A distância entre o sensor e a superfície em estudo, a emissividade da superfície, a posição do sensor em relação à posição do sol e a variabilidade da superfície são alguns deles, merecendo estudos específicos.

A emissão de energia radiante dos corpos ocorre dentro da faixa espectral de 0,75 a 1000 μm . A absorção de radiação pelo vapor d'água do ar nestes comprimentos de onda é bastante alta, tornando-se uma preocupação na determinação da temperatura de uma superfície pela energia por ele irradiada. Porém LORENZ (1968) apresentou um estudo que conclui que se a distância entre o sensor e o alvo for inferior a 154 m, essa influência do vapor d'água pode ser negligenciada.

Quanto à emissividade térmica ao infravermelho, GATES (1964) estabeleceu que todas as superfícies de plantas têm uma emissividade de 0,95 ou maior, com muitos valores ficando entre 0,97 e 0,98. A emissividade de uma cobertura vegetal deve ser maior que a de folhas individuais devido às cavidades formadas pela arquitetura foliar. A exposição de porções de solo pode influenciar

na quantidade de energia que alcança o sensor devido à diferença de emissividade entre a cobertura vegetal e o solo (HEILMAN et al., 1981), podendo ser fonte de erro.

FUCHS & TANNER (1966) mostraram que existe influência da radiação emitida por objetos na superfície em estudo e então refletida pela superfície para o sensor. Se a emissividade da superfície for menor que 1 e a radiação do entorno for desprezada, pode-se estar superestimando a temperatura da cobertura. Porém considerando que os sensores ao infravermelho utilizados na determinação da temperatura de superfícies fazem leituras na faixa espectral de 8 a 14 μm , a temperatura calculada a partir da radiação é geralmente muito próxima da temperatura real da superfície.

BOISSARD et al. (1990) apresentaram a influência da elevação do sol na temperatura da cobertura vegetal, provocando um aumento da energia que chega ao sistema, e alterando a situação de penetração e distribuição dos raios solares ao longo da cobertura vegetal.

A presença de nuvens provoca alterações da temperatura da superfície, alterando o equilíbrio do balanço de radiação, que leva algum tempo para ser restabelecido (FOLEGATTI 1988). PENNINGTON & HEATHERLY (1989) observaram que foram necessários cerca de 100 s para que a diferença entre a temperatura da cobertura vegetal e a temperatura do ar entrasse novamente em equilíbrio após a radiação direta ser encoberta por nuvens.

O ângulo zenital de visada é a inclinação do sensor em relação à perpendicular, e tem influência sobre a temperatura observada, pois a energia radiante de uma cobertura vegetal é função de sua geometria.

A variabilidade espacial que ocorre dentro de uma área vegetada leva à necessidade de um maior número de amostragens. HATFIELD et al. (1983) encontraram maior variabilidade no campo quando em solos nus e secos, em comparação com coberturas uniformes e completas.

As características arquitetônicas da cultura, sua forma de cultivo, a posição das linhas de cultivo também têm grande influência na temperatura da cobertura vegetal obtida por termometria ao infravermelho.

Calibração dos Termômetros ao Infravermelho

Os termômetros ao infravermelho disponíveis no mercado apresentam variabilidade de leitura da temperatura radiante, indicando a necessidade de calibração no momento da compra e periodicamente. Para isto, são usados calibradores que consiste em ajustar as temperaturas do termômetro com as temperaturas de um corpo negro (calibrador) aquecendo e resfriando, permitindo

assim, a elaboração de uma curva de calibração por meio de análise de regressão linear.

Uso da Temperatura da Cobertura Vegetal na Detecção do Estresse Hídrico

A utilização da temperatura da cobertura vegetal como indicador do estresse hídrico baseia-se no fato de que a transpiração da planta resfria a folha. À medida que o teor de água no solo diminui, a transpiração diminui e a temperatura da folha se eleva. Se pouca água é transpirada, as folhas ficarão mais quentes que o ar devido a absorção da radiação.

Buscando relacionar diretamente a temperatura da cobertura com seu estado de estresse hídrico, SUMAYAO et al. (1980) observaram que folhas de milho e sorgo, quando irrigados apresentaram temperatura mais altas do que a temperatura do ar quando esta era menor do que 33 °C e mais baixas quando maiores. Estes resultados estão de acordo com LINACRE (1964, 1967) que foi o primeiro a propor 33 °C como a temperatura limite. Esta constante foi discutida por BLAD & ROSENBERG (1976) que encontraram que a temperatura limite para a alfafa ocorria entre 23 e 30 °C. IDSO et al. (1981a) argumentaram que esta constante de temperatura não existe; mas ao contrário é um ponto dinâmico e depende do déficit de pressão de vapor.

A influência de diversos fatores climáticos e de solo na temperatura da cobertura vegetal direcionou o estudo da relação entre o estresse hídrico e a temperatura da cobertura vegetal e na determinação de índices que os relacionassem.

Segundo HATFIELD (1983), três diferentes aproximações foram propostas para a avaliação do déficit hídrico pelo uso da temperatura da cobertura vegetal: alguns autores propuseram que o estresse hídrico pode ser avaliado pelo exame das diferenças da temperatura da cobertura vegetal entre o campo em questão e uma área bem molhada da mesma cultura; outros sugeriram que pode-se esperar que a variabilidade das determinações de temperatura da cobertura vegetal dentro de um campo tratado similarmente aumente com o aumento da necessidade de água; outra proposta que surgiu é que fossem utilizadas as diferenças de temperatura entre o ar e a cobertura vegetal.

ASTON & Van BAVEL (1972) propuseram um método que utiliza a variabilidade da temperatura da cobertura vegetal como um indicativo do início do estresse hídrico da planta. A partir dos dados de CLAWSON & BLAD (1982) determinou-se a variabilidade da temperatura da cobertura vegetal da

cultura (CTV), definida como a diferença entre a máxima e a mínima de todas as temperaturas determinadas com termômetros ao infravermelho. Concluíram que as irrigações deveriam ser iniciadas quando CTV atingisse o valor de 0,8 °C. Afirmaram também que estes valores somente foram válidos quando a cobertura do solo pela cultura foi próxima da total. A partir dos mesmos dados, determinaram também a diferença de temperatura entre as parcelas irrigada e sob estresse; este índice foi chamado de temperatura de estresse diário (TSD). JACKSON (1982) explica que o uso de parcelas bem irrigadas como referência compensa efeitos do meio, tais como temperatura do ar e déficit de pressão de vapor. Observou que as irrigações ocorreram quando a temperatura da copa de parcelas sob estresse eram 1 °C superiores às irrigadas. Estes resultados mostraram que os dois índices, CTV e TSD poderiam ser utilizados como técnica de programação de irrigação.

PAZZETTI et al. (1993) utilizaram plantas de feijoeiro cultivadas em condições de campo, com o propósito de estabelecer uma relação entre as variações da temperatura da cobertura vegetal determinada com termômetro ao infravermelho e a produtividade da cultura. Concluíram que a evolução da temperatura de copa e os diferenciais de temperatura da copa entre as parcelas sob diferentes estados de estresse mostraram-se estritamente relacionados. Além disso, os resultados permitiram indicar que a temperatura da copa e os diferenciais de temperatura da copa podem ser empregados no monitoramento da irrigação. Já em outro trabalho com a cultura do feijoeiro, foram avaliados os desempenhos de dois índices: o primeiro baseado na diferença das temperaturas das superfícies entre uma parcela de referência e a área que se pretende irrigar, e o segundo baseado no desvio padrão da diferença das temperaturas. Ambos os índices se mostraram adequados para indicar o momento de iniciar a irrigação (COSTA & STEINMETZ, 1995; STEINMETZ & COSTA, 1995).

IDSO et al. (1977) determinaram a temperatura da copa da cultura do trigo, todos os dias durante o ciclo vegetativo, com o objetivo de desenvolver uma técnica para avaliar o déficit hídrico com um número mínimo de medidas, e assumiram que os fatores ambientais pressão de vapor do ar, radiação líquida e vento poderiam ser expressos na temperatura da copa. Estes autores definiram graus dias de estresse (SDD) como a diferença de temperatura da cobertura vegetal (T_c) e a temperatura do ambiente (T_a). Argumentaram ainda que o SDD aumenta com o aumento do déficit hídrico, ou seja, para uma menor disponibilidade de água para a transpiração corresponde o maior valor de SDD. A somatória dos valores de SDD, segundo JACKSON et al. (1977) pode ser utilizada como indicador do momento de irrigação. Para tal somatória, os autores

sugeriram que quando o valor de $(T_c - T_a)$ fosse negativo, dever-se-ia considerar o valor 0, acumulando apenas os valores positivos. Desta forma, pelos resultados por eles obtidos, quando a somatória de SDD atingisse o valor 10, deveria ser iniciada a irrigação para a cultura do trigo.

WIEGAND & NANKEN (1966) propuseram que a diferença entre a temperatura da cobertura vegetal e a temperatura do ar está relacionada com o estado de água da cultura. Mostraram que a temperatura da folha aumentou linearmente com o aumento da insolação e decresce linearmente com o aumento da turgidez relativa das folhas. Concluíram que a determinação da temperatura da folha requer determinações simultâneas da radiação.

A diferença entre a temperatura do ar e da cobertura vegetal foi combinada com dados de radiação líquida e de pressão de vapor, e utilizada por GEISER et al. (1982) como uma forma de determinar o momento de irrigação. Os autores compararam este método com o balanço hídrico e concluíram que o uso de água para irrigação foi menor quando a diferença de temperatura foi utilizada como critério, não ocorrendo diferença significativa na produção.

IDSO et al. (1981b) demonstraram que o índice de estresse hídrico determinado pela temperatura da cobertura e do ar, e umidade relativa do ar é função única do déficit de potencial da água na folha de alfafa, induzido pelo potencial da água no solo. Entretanto, para a comparação entre os dados obtidos em dois locais, o potencial de água na folha teve que ser corrigido em função do déficit de pressão de vapor. Tal correção permitiu uma discriminação precisa entre os tratamentos, utilizando somente determinações de $(T_c - T_a)$.

A combinação do balanço de energia e a fórmula aerodinâmica usados para estimar a evaporação de superfícies naturais (PENMAN, 1948) pode descrever a temperatura da superfície em função da radiação líquida e do déficit de pressão de vapor (DPV) (MONTEITH & SZEICZ, 1962). JACKSON et al. (1981) desenvolveram de forma teórica os limites para a relação entre $(T_c - T_a)$ versus DPV, definindo um índice de estresse hídrico, denominado CWSI. Vários experimentos envolvendo determinações de $(T_c - T_a)$ e DPV foram conduzidos para diferentes culturas (IDSO et al., 1981c), onde ficou demonstrado que por grande parte do período do dia, a relação $(T_c - T_a)$ versus DPV apresenta relações lineares para plantas transpirando à taxa potencial, a despeito de outros variáveis ambientais, exceto quando sob presença de nuvens. Os dados foram utilizados para determinar o que os autores denominaram como "linhas básicas" de estresse e de não estresse hídrico. Este fato foi utilizado para desenvolver, agora empiricamente, o CWSI. Em trabalho posterior, IDSO et al. (1990) conduziram experimentos para determinar os efeitos de diferentes locais de determinação da temperatura do ar e do DPV na avaliação das

“linhas básicas” do CWSI empírico, onde foi verificado que os diferentes locais de determinação (dentro do dossel vegetativo, logo acima da cobertura vegetal, e 10 m distante da área cultivada, a 1,6 m de altura) tiveram pouco efeito na determinação da linha.

A partir de dados de campo e simulados, STOCKLE & DUGAS (1992) fizeram uma análise da adequabilidade dos índices CWSI teórico e empírico para diferentes condições ambientais. Os resultados indicaram restrições do uso do índice para monitoramento da irrigação sob variações de clima, particularmente sob condições de baixo déficit de pressão de vapor, pois o índice apresentou grande variabilidade. HATFIELD et al. (1985) utilizaram a aproximação empírica do CWSI e observaram que a chamada “linha básica de não estresse” obtida é muito diferente quando em situação de cobertura parcial do solo, provocando erros substanciais no cálculo do índice, superestimando o estado de estresse. Consideram que em cobertura parcial, ocorreram mudanças nos fatores que são utilizados para cálculo da resistência aerodinâmica (deslocamento do plano zero e comprimento de rugosidade da superfície).

Avaliando as duas formas de interpretar a diferença entre a temperatura da cobertura vegetal e a temperatura do ar, O'TOOLE & REAL (1986) entenderam que a combinação das aproximações permite um maior entendimento e interpretação de $(T_c - T_a)$. Pela análise da relação linear de $(T_c - T_a)$ e o DPV, os autores encontraram valores da resistência da cobertura vegetal e da resistência aerodinâmica.

Uma das primeiras pesquisas desenvolvidas no Brasil com o uso da termometria ao infravermelho para a detecção de estresse hídrico foi desenvolvida por FOLEGATTI (1988, 1995). O autor conduziu um trabalho com o objetivo de determinar os diferentes índices de estresse hídrico (SDD, TSD, CWSI teórico e empírico) para a cultura do feijoeiro sob diferentes lâminas de irrigação. Concluiu, entre outras coisas, que as condições climáticas variáveis dificultam o cálculo do CWSI, ocorrendo influência de outros fatores ambientais, além do DPV, nos valores de $(T_c - T_a)$, e, também que a utilização de parcelas bem irrigadas como referência compensam efeitos de temperatura e DPV, desde que a radiação líquida e a velocidade do vento não variem durante as leituras.

AMORIM NETO et al. (1995a e 1995b) submeteram a cultura do feijoeiro a diferentes tensões de água no solo, e observaram que a diferença entre a temperatura da cobertura vegetal e do ar poderiam ser útil para a avaliação do estado hídrico da cultura. O uso do CWSI mostrou ser adequado para programar a irrigação da cultura.

Uso da Temperatura da Cobertura Vegetal na Estimativa da Evapotranspiração

O balanço de energia para uma cobertura vegetal pode ser escrito como:

$$R_n - G - H - \lambda E = 0 \quad (2.22)$$

em que, o R_n é a radiação líquida ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$); G é o fluxo de calor do solo ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$); H é o fluxo de calor sensível ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e λE é o fluxo de calor latente ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$). De uma forma simplificada, H e λE podem ser expressos como:

$$H = - \frac{\rho \text{ cp } (T_c - T_a)}{r_{a_h}} \quad (2.23)$$

$$\lambda E = - \frac{\rho \text{ cp } (e_s - e_a)}{\gamma (r_{a_v} + r_c)} \quad (2.24)$$

onde, ρ é a massa específica do ar atmosférico (kg m^{-3}); cp é a capacidade de calor do ar ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_c é a temperatura da cobertura vegetal ($^\circ\text{C}$); T_a é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$); e_s é a pressão de saturação de vapor à temperatura da cobertura vegetal (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); r_{a_h} é a resistência aerodinâmica à difusão de calor sensível (s m^{-1}), r_{a_v} é a resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água (s m^{-1}); e r_c é a resistência da cultura à difusão de vapor d'água (s m^{-1}). Considera-se que $r_{a_h} \approx r_{a_v} = r_a$, sendo portanto, r_a a resistência aerodinâmica à difusão de calor sensível e de vapor d'água (m s^{-1}). Uma discussão mais detalhada das hipóteses feitas é apresentada por MONTEITH (1973).

Uma forma de utilizar a temperatura da cobertura vegetal na estimativa da evapotranspiração é a substituição da equação (2.23) na equação (2.22), ou seja, estimar o fluxo de calor sensível pelo uso da temperatura da cobertura vegetal, e calcular a evapotranspiração como resíduo da equação (2.22):

$$\lambda E = R_n - G - \frac{\rho \text{ cp } (T_c - T_a)}{r_a} \quad (2.25)$$

Usando a equação (25), CHOUDHURY et al. (1986) e BEN-ASHER et al. (1992) encontraram boa relação entre os valores de evapotranspiração estimados e valores medidos, porém o uso da temperatura radiante subestimou os valores medidos pelo segundo autor em 12%.

Utilizando a temperatura da cobertura vegetal para estimar o fluxo de calor sensível e a pressão de vapor para estimar o fluxo de calor latente, equações (2.23) e (2.24), pode-se encontrar uma equação que descreva a diferença entre a temperatura da cobertura vegetal e a temperatura do ar em função da radiação líquida, da velocidade do vento, do déficit de pressão de vapor e das resistências aerodinâmica e da cultura. Combinando as equações (2.22), (2.23) e (2.24), e rearranjando, pode-se obter uma equação que calcula o valor da relação entre r_c e r_a (JACKSON, 1981). Como o valor da resistência aerodinâmica (r_a) pode ser estimado podemos isolar o valor de r_c . O resultado desta equação pode ser utilizado tanto como entrada na equação de Penman-Monteith, como também substituição das diversas formas de estimativa da resistência da cobertura vegetal, maior problema encontrado pelos pesquisadores na utilização do modelo.

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{N.3600.\rho.cp.(e_s - e_a)}{\gamma r_a \left[(R_n - G) - \frac{N.3600.\rho.cp.(T_c - T_a)}{r_a} \right]} - 1 \quad (2.26)$$

Trabalhando com termometria ao infravermelho para estimar a resistência de dossel (r_c) da grama, a partir de temperatura do dossel do horário de 12:00 hs, MAGIOTTO (1996) encontrou boa performance no modelo de Penman-Monteith que pode ser utilizado na estimativa da evapotranspiração de referência.

CAMPECHE (1997) comparou a evapotranspiração de referência medida em lisímetro de pesagem e estimada pela equação de Penman-Monteith, utilizando valores de resistência de dossel obtidos com o uso da termometria ao infravermelho em períodos de 24 horas. O autor verificou que o valor estimado superestimou a evapotranspiração no lisímetro de pesagem em 24,8% (Figura 2.17).

Considerações Finais

A estimativa da resistência de dossel (r_c) das culturas e a evapotranspiração calculada pela equação de Penman-Monteith por meio da termometria ao infravermelho podem ser uma ferramenta útil nos estudos relacionados a evapotranspiração e ao manejo de irrigação, desde que

considerados os fatores limitantes para a aplicação da técnica.

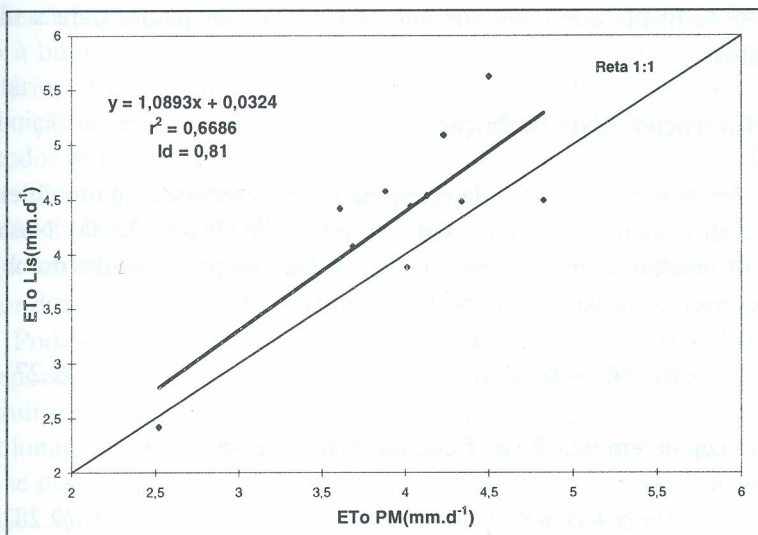


Figura 2.17. Evapotranspiração estimada pela equação de Penman-Monteith com o uso da termometria ao infravermelho em relação a evapotranspiração medida em lisímetro de pesagem para períodos de 24 horas.

Reflectância e Déficit Hídrico em Plantas

Os materiais bibliográficos usados para elaboração deste tópico encontram-se basicamente em STEFFEN et al.(1996), VETTORAZZI (1992) e MOREIRA (1997).

A radiância é uma grandeza radiométrica que depende da iluminação solar e principalmente do modo particular como cada objeto reflete a radiação solar. Este fenômeno pode ser estudado através de espectros de reflectância ou assinaturas espectrais desses objetos que estão intimamente relacionados com suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Diferenças nas assinaturas espectrais dos objetos terrestres produzem diferenças correspondentes nas suas radiâncias e por esta razão aparecem de maneira distinta nas imagens orbitais. Por outro lado, as variações na radiância espectral em um mesmo tipo de objeto são decorrentes de alterações nas suas propriedades e estas relações podem ser estudadas através de suas assinaturas espectrais. O estudo do comportamento espectral dos objetos terrestres, isto é, das relações entres as suas assinaturas espectrais e suas propriedades físico-químicas e biológicas, é fundamental para

o desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto e constitui um importante campo da pesquisa fundamental. A aquisição de assinaturas espectrais deve ser realizada com equipamentos e técnicas adequadas para a medição dos dados.

Interação Alvo Radiação

Um fluxo de radiação eletromagnética ao interagir com um objeto pode ser parcialmente refletido, absorvido e transmitido (Figura 2.18a). Neste caso, os fluxos resultantes tem valores que dependem das propriedades do objeto. A lei da conservação da energia permite escrever que:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (2.27)$$

e normalizando em relação ao fluxo incidente tem-se:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (2.28)$$

onde, as razões adimensionais ρ , α e τ são denominadas reflectância, absorptância e transmitância, respectivamente. Essas razões são consideradas propriedades radiométricas do objeto analisado. O fluxo absorvido não pode ser medido diretamente, portanto a absorptância pode ser deduzida da equação acima após a determinação da transmitância e da reflectância.

Reflectância

Reflectância é um termo importante, mas freqüentemente usado de forma errada em sensoriamento remoto (CURRAN, 1985). Os dois erros mais comuns, são em primeiro lugar o uso da palavra reflectância no lugar de radiância (que é na verdade o que esta sendo registrado pelo sensor), e em segundo lugar o uso do termo reflectância sem a definição adequada. Se a reflectância for registrada dentro de uma faixa limitada de comprimentos de onda, deverá ser descrita como reflectância espectral (ρ_λ); e se for registrada de um angulo específico deverá ser relatado.

Para descrever a natureza angular da reflectância, dois termos um tanto genéricos são usados: hemisférica e direcional. Hemisférica refere-se a um angulo de incidência ou reflexão do fluxo radiante sobre uma hemisfera; e direcional refere-se à incidencia ou reflexão do fluxo radiante para uma única

direção. Na literatura de sensoriamento remoto a maioria das referências de medições de reflectância espectral diz respeito tanto à bihemisférica (simplificado para hemisférica), que é o caso de estudos em laboratório de reflectância, como à bidirecional, que é o caso de medições de radiância com sensores satelitários. A medida ideal para o uso do sensoriamento remoto é a função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF) que é a reflectância bidirecional para todos os possíveis ângulos de reflexão. Como o BRDF é muito difícil de ser medido, os pesquisadores utilizam uma medição simplificada, a do fator de reflectância bidirecional (BRF). O BRF é a relação entre radiância espectral ($N\lambda$) a um determinado ângulo (θ) em relação ao objeto de interesse e um refletor difuso a um ângulo (θ) dentro da cena.

Pode-se medir a reflectância de uma folha verde nas faixas do espectro correspondentes ao azul, verde, vermelho e infravermelho (IR) próximo e construir um gráfico como o da Figura 2.18b, onde aparecem, representados em colunas, os valores médios da reflectância da folha nessas quatro faixas. Nota-se neste gráfico, que a folha reflete mais fortemente os componentes de radiação verde (G) e IR e de forma menos intensa o azul (B, absorvido no processo de fotossíntese) e o vermelho (R, absorvido pela clorofila). Se um conjunto de bandas espectrais bem estreitas e adjacentes for selecionado para a medida da reflectância espectral da folha, pode-se conseguir um gráfico como o da Figura 2.18c, denominado assinatura espectral e que representa, de forma mais detalhada, o resultado da interação da energia radiante com a amostra. Note que a assinatura espectral da folha é dominada pela absorvância na região do visível e pela reflectância na região do IR. As variações de amplitude nas assinaturas espectrais são indicadoras de propriedades que se manifestam na interação da radiação electromagnética com as amostras.



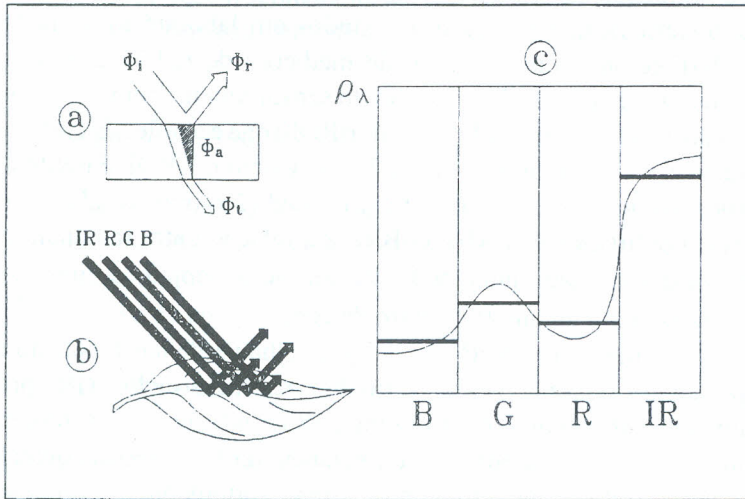


Figura 2.18. Interação radiação objeto

Medição da Reflectância

As grandezas radiométricas, na região do ultravioleta (UV) ao IR distante podem ser medidas por meio de equipamentos denominados radiômetros ou espectroradiômetros ópticos. O esquema da Figura 2.19a, mostra de forma simplificada, a estrutura de um radiômetro na qual podem-se destacar os seguintes componentes: 1) coletor, componente óptico construído com lentes e espelhos cuja função é concentrar o fluxo de radiação proveniente da amostra sobre o detector; 2) filtro, tem a finalidade de selecionar a banda espectral do fluxo de radiação que atinge o detector; 3) detector, dispositivo de estado sólido, geralmente de pequenas dimensões e feito de materiais cujas propriedades elétricas variam ao absorver um fluxo de energia radiante. Um detector absorve energia radiante e a transforma em energia elétrica cuja amplitude é proporcional ao fluxo absorvido. Em geral os radiômetros utilizam detectores feitos de silício (Si) para as bandas do UV visível e IR próximo e de sulfeto de chumbo (PbS) para a banda do IR; 4) processador, sistema eletrônico capaz de realizar a amplificação do fraco sinal elétrico gerado pelo detector. Os detectores geram sinais mesmo na ausência de radiação e estes sinais de natureza aleatória são

denominados ruído e se adicionam aos sinais produzidos durante a medição. Como o ruído tem um nível mais ou menos constante o seu efeito é mais significativo quando o sinal da medida é fraco, em caso contrário, o processador pode filtrar esses sinais indesejáveis diminuindo a sua influência na medida. O processador também pode realizar a conversão dos sinais elétricos resultantes, que são de natureza analógica, para valores binários (digitalização); 5) unidades de saída, dispositivos utilizados para registrar ou indicar a amplitude dos sinais provenientes do processador. As unidades de saída registram ou exibem os valores relativos dos sinais elétricos, entretanto podem ser calibradas para apresentar os valores absolutos da grandeza para o qual o radiômetro está configurado.

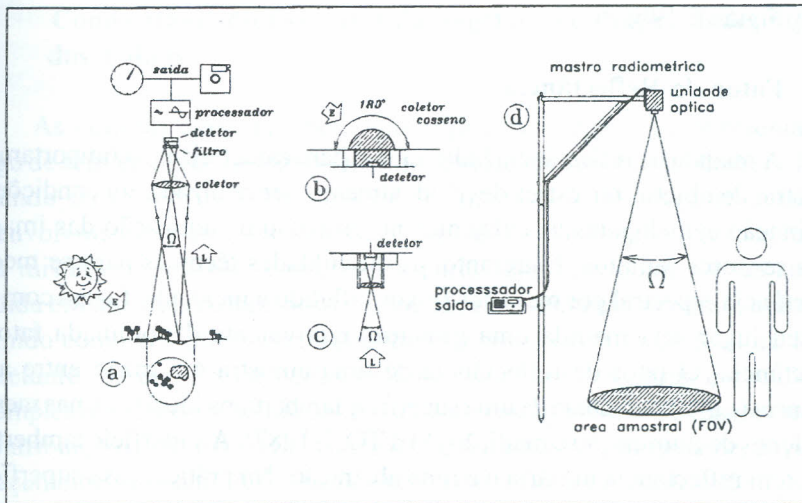


Figura 2.19. O radiômetro óptico

O radiômetro detecta uma área de amostra que corresponde à projeção (geométrica) do detector sobre a superfície (Figura 2.19a). Neste caso, o fluxo de radiação que é focalizado sobre o detector é proveniente dessa área. A qualidade de um radiômetro é indicada pela sua resolução. Assim, o tamanho da área amostrada depende da resolução angular do coletor, também denominado campo de visada do radiômetro (Ω , Figura 2.19c e 2.18d). Da mesma forma, o menor intervalo espectral em que o radiômetro consegue realizar as medidas, determina a sua resolução espectral e a menor variação de amplitude da medida

que o sistema consegue registrar, determina a sua resolução radiométrica. Um radiômetro como o da Figura 2.19a mede a radiância espectral média relativa dos objetos contidos no seu campo de visada. Entretanto, esse equipamento pode ser calibrado para medir a radiância espectral média absoluta ($W/m^2 \cdot sr \cdot nm$) por meio de medida de radiância espectral de uma fonte padrão cujo espectro de radiância é conhecida. Neste caso, os fatores espectrais de calibração são os valores que devem ser multiplicados pelos sinais obtidos nas unidades de saída para obtenção de valores absolutos do espectro de radiância espectral da fonte utilizada como padrão. Em geral, os radiômetros usados na medida de radiância em campo tem um campo de visada de abertura pequeno ($< 20^\circ$, Figura 2.19b). Quando utilizados para a medida de irradiância, os radiômetros devem ser equipados com um coletor coseno, isto é, um dispositivo óptico capaz de estender o campo de visada do radiômetro para todo o hemisfério de incidência (180° , Figura 2.19b).

Fator de Reflectância

A medida de reflectância bidirecional para caracterizar o comportamento espectral de objetos terrestres deve, idealmente, ser realizada em condições de iluminação semelhantes às existentes no processo de aquisição das imagens pelos sensores remotos. Entretanto, as dificuldades técnicas para se medir a reflectância espectral por meio dos fluxos refletido e incidente, fazem com que, em seu lugar seja medida uma grandeza equivalente denominada fator de reflectância. O fator de reflectância de uma amostra é a razão entre a sua radiância (L_a) e a radiância de uma superfície lambertiana ideal (L_r), nas mesmas condições de iluminação e medição (MILTON, 1987). A superfície lambertiana ideal tem reflectância unitária e é uma abstração. Na prática, essa superfície é materializada através de uma superfície de referência feita de uma placa plana recoberta com Sulfato de Bário ($Ba SO_4$) ou Óxido de Magnésio (MgO) e calibrada por comparação com uma placa padrão de laboratório cujo espectro de reflectância é conhecido. Da mesma forma que a reflectância, o fator de reflectância espectral depende das propriedades da amostra, da geometria de iluminação da medição e da faixa espectral utilizada.

A medida do fator de reflectância deve ser realizada em campo sempre que se pretende preservar as propriedades das amostras e as condições de iluminação natural à que são submetidos quando varridos pelos sensores remotos. Entretanto, é bom lembrar que a radiometria de campo é trabalhosa e exige condições atmosféricas adequadas. Para preservar a configuração do fator de reflectância bidirecional é conveniente realizar medições com a presença de no

máximo 20% de cobertura de nuvens no horizonte. Adicionalmente, deve-se considerar que o espectro solar, apesar de sua elevada potência, apresenta interferências provocadas pela absorção atmosférica, o que dificulta a obtenção de espectros contínuos na região do IR.

A eficiência da medição radiométrica em campo depende de um bom planejamento. Nesta fase, deve-se definir as características radiométricas das medidas, como a banda, a resolução espectral e as dimensões das amostras. Isto permite selecionar o tipo de radiômetro e a estrutura de elevação necessária. Para medidas em amostras localizadas, de pequeno tamanho, um tripé simples é suficiente. No caso de uma área não muito extensa, com amostras de até 1 m², no caso da maioria das medidas em solos e culturas, pode ser utilizado estruturas como o mastro de elevação (Figura 2.19d).

Comportamento Espectral da Vegetação e Propriedades Ópticas das Folhas

As culturas agrícolas, bem como qualquer vegetação, apresentam ao longo de seus ciclos de desenvolvimento, condições variadas de dosséis. Em se tratando da reflectância de uma determinada cultura, durante a fase de desenvolvimento vegetativo o dossel é considerado *incompleto*, pois apresenta uma mistura de resposta espectral da parte aérea das plantas e do solo. À medida em que essa cultura atinge o seu desenvolvimento máximo, o dossel é definido como *completo*, correspondendo a uma cobertura vegetal de 100%. Entretanto, os dosséis de certas culturas, tais como o citrus e o café, são incompletos mesmo em condições de máximo desenvolvimento vegetativo, pois a contribuição do solo na reflectância dessas culturas é muito grande, devido ao espaçamento utilizado. A interação entre a radiação solar e o dossel vegetativo ocorre principalmente por meio dos pigmentos contidos nas folhas. Logo, toda a discussão das propriedades ópticas da folha é válida, até certo ponto, quando se considera o dossel, uma vez que a folha é o principal componente do mesmo. Entretanto, nos estudos das características espectrais de dosséis vegetativos, não se pode aplicar diretamente os princípios que regem as propriedades ópticas das folhas. Isso porque a constituição do dossel é mais complexa, ou seja, o dossel é formado por várias camadas, que interagem com a radiação de forma diferente quando comparado com uma única folha (BAUER, 1975).

A região do infravermelho (IR) é constituída da radiação solar, cujo comprimento de onda situa-se na faixa espectral entre 700 nm a 1 mm. Didaticamente, esta região é dividida em três partes a saber: a) IR próximo (700 a 1300 nm), b) IR médio (1300 a 2500 nm) e c) IR distante (2500 nm a 1

mm). Na região do IR próximo, as propriedades ópticas da folha são dominadas, principalmente, pelas estruturas celulares internas. Muito embora, haja uma contribuição indireta do conteúdo de água da folha. Nessa região espectral, a absorção é muito baixa (menos de 15 %) e a reflectância pode chegar até 50 %, dependendo da estrutura anatômica das folhas (TUCKER & GARRATT, 1977). Por outro lado, na região do IR médio, as propriedades ópticas das folhas são afetadas, exclusivamente, pelo conteúdo de água no interior das mesmas. Próximo de 1450, 1950 e 2600 nm, ocorrem depressões na curva espectral, devido a absorção da radiação pela água e os picos de reflectância da folha ocorrem em 1600 e 2200 nm (HOFFER, 1978).

Para se ter uma idéia geral do espectro refletido pela vegetação, é mostrado na Figura 2.20 uma curva espectral de uma folha verde, obtida de 400 a 2500 nm. É importante salientar que na região do IR próximo, a quantidade de radiação refletida por várias camadas de folhas é bem maior que a refletida por uma única folha. Isto ocorre devido a um fenômeno denominado por KNIPLING (1970) de fator de compensação e por HOFFER (1978) de reflectância aditiva.

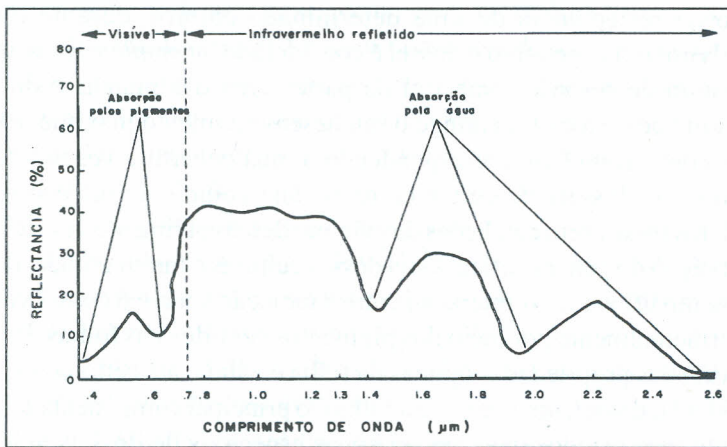


Figura 2.20. Principais características da resposta espectral de uma folha verde HOFFER, 1978).

Os dosséis de culturas agrícolas exibem, no campo de visada do sensor, quatro componentes com diferentes propriedades de reflectância óptica: a) vegetação iluminada, b) solo iluminado, c) vegetação sombreada, e d) solo sombreado (REICHARDSON et al., 1975; KOLLENKARK et al., 1982). A magnitude de cada componente varia com a cobertura vegetal, orientação e

espaçamento das fileiras, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõe o dossel, diâmetro da copa da planta, altura da planta, teor de água na planta, condições fitossanitária, ângulo zenital e azimutal do sol, latitude e resolução do equipamento utilizado nas medições (KOLLENKARK et al., 1982).

A reflectância do dossel, nas regiões do visível e IR próximo, é indiretamente afetada pelo do turgor celular (MYERS, 1970). Quando uma cultura sofre um estresse de água (reduzindo seu turgor celular), as mudanças iniciais da reflectância são mais pronunciadas na região do visível do que no IR próximo, devido à sensibilidade da clorofila a distúrbios fisiológicos. Porém, a detecção das condições de estresse se baseia, não na mudança da reflectância de folhas individuais, mas na redução da área foliar total exposta ao sensor, por perda direta de folhas, mudança de sua orientação, ou ainda da supressão do crescimento da planta. Nesses casos, a reflectância do IR tende a ser reduzida relativamente mais do que a do visível, por causa da redução do realce do IR ou por aumento da exposição do solo (KNIPLING, 1970).

Influência do Teor de Água no Comportamento Espectral das Folhas

Considerando todo o espectro reflectivo, pode-se pensar em duas situações da influência da água na reflectância das folhas. No primeiro caso, em folhas túrgidas a absorção da radiação pela água é muito acentuada na faixa espectral entre 1300 nm a 2500 nm, conseqüentemente, tem-se uma baixa reflectância (WOOLEY, 1971; TUCKER & GARRATT, 1977; GATES, 1980). Neste caso, a água absorve mais fortemente a radiação solar nos comprimentos de ondas próximo a 1400 nm, 1900 nm e 2600 nm e possui um pico de reflectância máximo em 1450 e 2200 nm (Figura 2.20). CARTER (1991) denomina este efeito de *primário*, uma vez que o decréscimo na reflectância se deve exclusivamente a água. O segundo caso diz respeito as propriedades ópticas das folhas nos comprimentos de ondas abaixo de 1300 nm, onde pouca atenção tem sido dada a influência do conteúdo de água na reflectância das folhas (BOWMAN, 1989; HUNT & ROCK, 1989; CARTER, 1991). Comparado com o efeito primário, a absorção da radiação solar é menos pronunciada entre 700 nm a 1300 nm e, menos ainda, de 400 nm a 700 nm. CARTER (1991) denomina esse efeito de *secundário*, porque não pode ser explicado somente pela propriedade absorptiva da água e devem ser incluídas influências de outras substâncias das folhas, como os pigmentos. BAUER et al.(1980) e RIPPLE (1986) atribuem ao efeito secundário do conteúdo de água nas folhas às variações

no nível de clorofila e desarranjo nas estruturas internas da folha. Segundo os autores, a redução do conteúdo de clorofila nas folhas propicia uma menor absorção de energia na região do visível, conseqüentemente, aumentando a reflectância nesta faixa espectral. Na Figura 2.21, podem ser visualizadas curvas de reflectância espectral, obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdo de água.

A água além de influenciar a reflectância no IR médio, tem efeito sobre a reflectância na faixa do visível e do IR próximo (RIPPLE, 1986). No IR médio, a reflectância é afetada tão somente pelas propriedades absorptivas da água. Entretanto, as relações entre o teor de água na folha e a reflectância nas regiões do visível e do IR próximo não são diretas. Geralmente em plantas com estresse hídrico, diminui a concentração de clorofila e provoca um desarranjo nas estruturas internas. Com isto, folhas com estresse de água têm maior reflectância no vermelho (menor absorção) e no IR próximo.

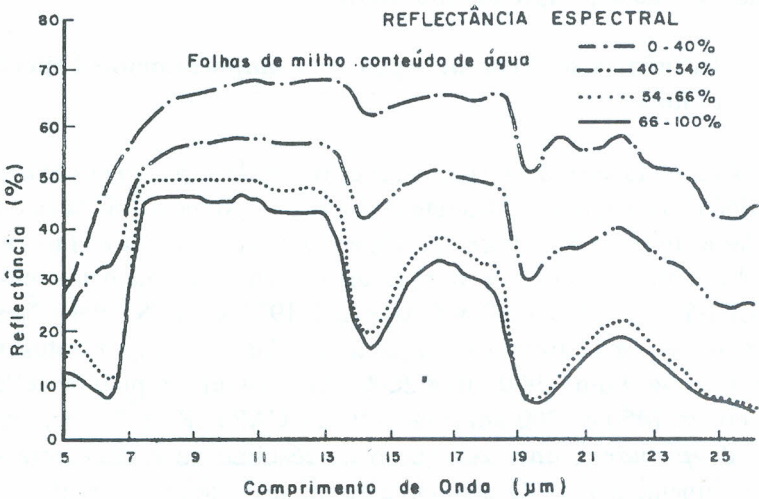


Figura 2.21. Curvas da reflectância espectral, obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdo de água (HOFFER, 1978).

Aplicações da Radiometria

A radiometria ou espectroradiometria de campo é uma técnica de fundamental importância tanto no nível de pesquisa básica quanto na aplicação operacional dentro dos objetivos do sensoriamento remoto (MILTON, 1987).

Os dados coletados, por meio dessa técnica, são úteis nos estudos das relações entre as características espectrais dos objetos (alvos), sobre a superfície terrestre, e seus atributos biofísicos. Na agricultura por exemplo, é possível estabelecer relações funcionais entre a resposta espectral com o índice de área foliar, a produção de fitomassa e/ou grãos, o estresse hídrico, entre outros (ASRAR et al., 1984; AASE et al., 1984; WIEGAND & RICHARDSON, 1987 ASRAR et al., 1989).

2.5 INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS DE MEDIÇÃO NO SOLO

Sonda de Neutrons

A sonda de neutrons, instrumento de determinação da umidade do solo, tem sido grandemente utilizado quando a profundidade de interesse é acima de 15 cm, com algumas restrições. O instrumento consiste de uma sonda com fonte de neutrons rápidos, usualmente Amerídio 241/Berilo, um detector Hélio-3 para os neutrons termalizados, que desce por um tubo de parede fina de alumínio, ferro ou PVC, cravado no solo, e um registrador eletrônico.

Ao ser acionada, a fonte libera neutrons que se espalham colidindo com os diferentes corpos no solo que provocam redução da sua energia cinética. A redução da energia é máxima quando os neutrons encontram núcleos de Hidrogênio presentes no solo que reduzem a sua energia inicial a valores característicos dos núcleos de H. Embora o hidrogênio seja um componente da matéria orgânica, a maior parte deste elemento no solo ocorre como componente da água. Portanto, a contabilização dos neutrons termalizados, ao redor da fonte de neutrons rápidos, indica de forma razoável o teor de água no solo. A quantidade de neutrons termalizados pode ser calibrada com a umidade volumétrica do solo com resolução na faixa de $0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A presença de uma nuvem de neutrons ao redor da fonte restringe o uso desta técnica ao campo, ou seja, sua utilização é difícil, para não dizer inviável, em laboratório. O raio da nuvem esférica de neutrons varia com a umidade do solo, indo de 0,15 m para solo saturado a 0,60 m para solo seco.

Procedimento para Utilização do Equipamento

O seguinte procedimento é feito para se usar a sonda de neutrons como indicador da umidade do solo:

1. Instale o tubo de acesso em furos, previamente abertos com trado, no

solo. O diâmetro interno do tubo de acesso deve ser de 40 mm a 50 mm, dependendo do equipamento. Cerca de 100 mm de tubo deve ser deixado acima da superfície do solo para apoio do instrumento de medição. Recomenda-se, entre uma medição e outra, tampar a extremidade do tubo para evitar entrada de água ou sujeira;

2. Coloque o instrumento sobre o tubo de acesso e selecione um tempo apropriado para contagem de acordo com recomendação do fabricante. Para proteção contra danos causados por água, verifique o tubo de acesso, para ver se não está com água, antes de baixar a sonda;

3. Desça a sonda dentro do tubo até a profundidade desejada. Acione a fonte iniciando a contagem dos neutrons termalizados. Faça uma ou mais contagens em cada profundidade selecionada. Use incrementos de 150 mm para as diferentes profundidades lembrando que a menor profundidade dever ser superior a 150 milímetros;

4. Converta a relação de contagens (solo/padrão) para umidade volumétrica pela curva de calibração específica ou pela equação interna do aparelho. O aparelho mostra a contagem por minuto (CPM) que deverá ser convertida para relação de contagens.

Calibração e Configuração de Modelos Recentes

A equação interna de calibração do aparelho, fornecida pelo fabricante, pode ser considerada adequada para muitos casos. Porém, recomenda-se verificar tal calibração determinando-se umidade gravimétrica e peso específico aparente do solo a ser manejado. Em caso de diferença grande entre valor real e estimado, sugere-se a calibração do aparelho em campo ou laboratório.

Os modelos recentes de equipamentos de sonda de neutrons dispõem dos seguintes itens: a) microprocessador integrado, com pelo menos 13k de memória de registro, além de equações de calibração para diferentes tipos de solo; b) bateria recarregável; c) transferidor de dados para PC ou impressora através de cabo RS232C (Figura 2.22). Para resgatar os dados registrados na memória eletrônica para uma impressora ou para um computador pessoal, diretamente ou via modem, basta usar o comando específico do aparelho, de acordo com o programa fornecido pelo fabricante. De maneira geral, os dados são transferidos como arquivo, no formato padrão ASCII, no sistema de transmissão ACK/NACK.

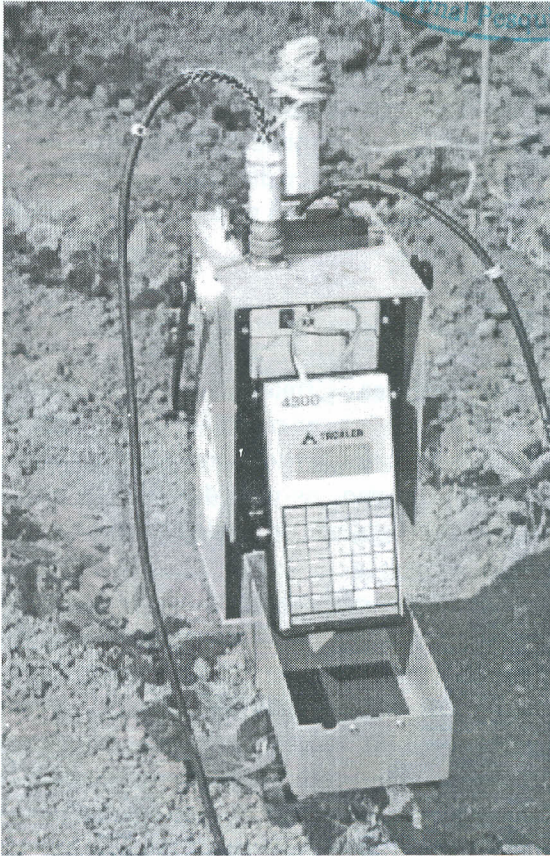


Figura 2.22. Sonda de neutrons em operação numa cultura de feijão irrigado por aspersão.

Sonda de Raios Gama

Césio-137, por emitir raios gama a 0,662 MeV de energia e meia vida de 30 anos, e Amerídio-241 a 0,060 MeV e meia vida de 470 anos, têm sido usados na determinação indireta da umidade do solo pelo método da sonda de raios gama.

O método baseia-se na atenuação de raios gama pelo solo. O grau de atenuação de um feixe de raios gama que atravessa uma coluna de solo

depende dos elementos constituintes e do peso específico aparente desse solo. Se os constituintes sólidos e o peso específico aparente de um determinado solo permanecerem constantes, a variação na atenuação de raios gama irá representar a variação da umidade do solo.

O uso da sonda de raios gama está restrito ainda aos laboratórios, devido à complexidade desta técnica. A precisão do método para determinação da umidade de solo varia com a espessura e peso específico da coluna de solo, das características de absorção do solo, e da relação entre absorção por solo seco e por solo úmido. Detalhes do método podem ser obtidos em HOPMANS & DANE (1986), entre outros.

Blocos Porosos

A condutividade elétrica e térmica bem como a capacitância de materiais porosos variam com o teor de água no seu meio e podem ser facilmente medidas, com grande precisão. Se existir uma boa correlação destas propriedades com o teor de água no meio poroso, os métodos usados para determinar tais propriedades poderão ser de grande utilidade na determinação do teor de água no solo.

Muitos dos problemas envolvidos na medição direta da condutividade elétrica, da condutividade térmica e da capacitância de solo, são evitados quando se usa blocos porosos contendo eletrodos apropriados, que são inseridos no solo. Quando estes blocos atingem o equilíbrio, isto é, quando cessa o movimento de água entre estes e o solo, suas propriedades térmicas ou elétricas são frequentemente consideradas como indicadores do teor de água no solo. Contudo, o valor associado de umidade do solo deve ser obtido a partir de uma curva de calibração feita usando solo tirado no local onde os blocos serão instalados porque o equilíbrio entre o bloco e o solo é equilíbrio entre os potenciais matriciais e não entre teores de água. Como diferentes solos tem diferentes curvas de capacidade de retenção de água, existirão diferenças grandes entre as correlações das propriedades do bloco com o teor de água no solo. As calibrações são frequentemente feitas no campo pela obtenção do teores de água por método gravimétrico que são plotados como função de leituras de resistência elétrica, ou, com a instalação de blocos em vasos com plantas onde o teor de água é determinado pela pesagem dos vasos.

Entre as propriedades citadas acima, a condutividade elétrica, é a de medição mais simples. Portanto, a técnica mais usada com os blocos porosos é a da relação entre condutividade elétrica e teor de água.

É difícil especificar a precisão esperada na determinação do teor de água no solo usando medidas de condutividade elétrica em blocos porosos por causa das várias fontes de erro envolvidas. A precisão não depende somente dos cuidados na confecção, seleção, e calibração dos blocos, mas também do fator histerese do solo que foge do controle do operador. Portanto, não se pode esperar precisão acima de 2% nos valores de umidade do solo. Por outro lado, onde blocos porosos são usados para estimar o potencial matricial ao invés de umidade, é possível conseguir um melhor desempenho do método.

Descrição do Sistema

O sistema de blocos porosos usado na determinação do teor de água no solo é constituído de: a) "Ponte de Wheatstone" para medição da resistência elétrica: Resistências a serem medidas variam de algumas centenas de ohms a 200 000 ou mais ohms. As pontes em uso são do tipo de corrente alternada, para evitar polarização nos eletrodos inseridos no bloco poroso. A medição da resistência é feita colocando-se os blocos nas profundidades desejadas, deixando as pontas dos fios à superfície do solo. Instrumentos para leitura digital usados em sistema de aquisição de dados podem ser de grande utilidade na obtenção dos dados para posterior transferência e determinação dos teores de água no solo a partir de curvas ou equações específicas de calibração. b) "Bloco poroso": Os blocos disponíveis no mercado são feitos de diversos materiais porosos que vão desde o tecido de nylon e fibra-de-vidro até aos blocos de gesso-resinado moldados em diferentes formas. Os blocos possuem no seu interior um sistema de eletrodos que basicamente consiste de dois fios elétricos finos ligados, cada um, a uma pequena tela de aço inox. As pequenas telas são mantidas separadas a 1 cm ou 2 cm de distância.

Calibração dos Blocos Porosos

A calibração de blocos porosos é necessária e é feita para solo com peso específico semelhante ao do solo no campo, contido em um recipiente (caixa de tela) que permita perda rápida de água por evaporação sem perda de solo. Usa-se uma pequena caixa de tela, aberta em uma das faces, com dimensões que permitam a colocação de volume de solo suficiente para envolver o bloco poroso com pelo menos 2 cm de camada de solo ao redor do bloco. Inicia-se o processo umedecendo o solo a ser usado de maneira a facilitar a sua colocação ao redor do bloco no recipiente de calibração com peso específico desejado. Toma-se uma parte do solo para determinação de umidade

gravimétrica. Completa-se a caixa com solo e em seguida pesa-se o conjunto solo mais tara (bloco com seus conectores e caixa). Usando a umidade gravimétrica determinada à parte (U), determina-se a massa de solo seco(m_s) contida na caixa, usando a expressão abaixo:

$$m_s = \frac{(m_u + tara) - (tara)}{U + 1} \quad (2.29)$$

onde m_u é a massa de solo úmido e U é o valor de umidade gravimétrica expressa em g/g. Em seguida, satura-se o solo, pesa-se o conjunto (tara + m_u) e faz-se a leitura da resistência no bloco poroso para determinar o primeiro ponto da calibração. As umidades com base em peso deste e de todos os demais pontos subsequentes da calibração serão determinadas pela expressão:

$$U = \frac{(tara + m_u) - (tara + m_s)}{m_s} \quad (2.30)$$

Permita a evaporação da água do conjunto até que se tenha um valor desejado para o próximo ponto de calibração. Após obter a pesagem desejada, o conjunto é colocado em um recipiente fechado em temperatura uniforme ficando nesta condição durante pelo menos uma noite, para permitir o equilíbrio da água entre o bloco e o solo. Faz-se, após o equilíbrio, a leitura da resistência no bloco poroso. O processo é repetido de modo a se ter o maior número possível de pontos de calibração. Ajuste uma equação para resistência elétrica como função da umidade ou plote os pontos em papel semi-logarítmico. No final de todo o processo, tem-se a equação ou curva de calibração para a profundidade específica de instalação do bloco poroso.

Tensiômetros

Toda vez que um solo não estiver saturado, nele existe ar e, portanto existem interfaces água/ar (meniscos) que lhe conferem o estado de tensão (pressão negativa). Assim, a água no solo, via de regra, encontra-se sob tensões. A tensão, chamada de potencial matricial, é resultante da afinidade da água com a matriz do solo, devida às forças adsorptivas e de capilaridade oriundas das forças coesivas e adesivas que se desenvolvem dentro e entre as três fases do solo.

Descrição e Princípio de Funcionamento dos Tensiômetros

O potencial matricial da água em diferentes pontos no solo é determinado diretamente com *tensiômetro*. Este dispositivo consiste de uma cápsula de cerâmica porosa conectada a um manômetro (vacuômetro) através de um tubo geralmente de PVC ou acrílico. Quando colocado no solo, a água contida na cápsula tende a entrar em equilíbrio com a tensão da água no solo ao seu redor. Qualquer mudança no teor de água do solo e conseqüentemente em seu estado de energia, será transmitido à água no interior da cápsula, sendo indicada rapidamente pelo vacuômetro. A cápsula do tensiômetro funciona como uma membrana semi-permeável, permitindo a livre passagem de água e íons, não permitindo a passagem de ar e partículas de solo. Teoricamente, o tensiômetro poderia medir tensões de até 101,3 kPa; na prática, porém, só é possível medir até 80 kPa aproximadamente. Acima desta tensão o ar penetra no instrumento através dos poros da cápsula, a água começa a passar do estado líquido para o estado de vapor e as medições perdem precisão.

O valor de ψ_m do solo ao redor da cápsula, de um tensiômetro com manômetro de mercúrio, do tipo representado na Figura 2.23, é dado por:

$$\psi_m = -12,6 h + h_1 + h_2 \quad (2.31)$$

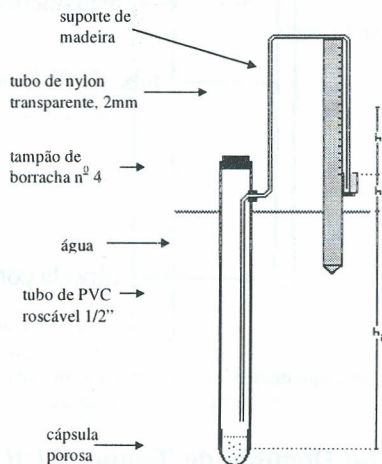


Figura 2.23. Representação esquemática de um tensiômetro com manômetro de mercúrio.

onde h corresponde à elevação do Hg no manômetro, h_1 é a distância da superfície livre do Hg no reservatório (cubeta) à superfície do solo, e h_2 a profundidade de instalação do tensiômetro. Com as medições em *cm*, o valor de Ψ_m é obtido em *cmca*.

Para tensiômetro com manômetro mecânico (2. 24), o valor de Ψ_m é dado por:

$$\Psi_m = -\ell + 0,098 c \quad (2.32)$$

onde ℓ é a leitura do manômetro em *cbar* ou *kPa* e c o comprimento do tensiômetro (distância da cápsula ao manômetro) em *cm*. O Ψ_m é obtido em *kPa*.

Para tensiômetro com manômetro digital (tensímetro) (Figura 2.25), o valor de Ψ_m , também em *kPa*, é dado por:

$$\Psi_m = \ell + 0,098 c \quad (2.33)$$

para leitura em *cbar* ou *kPa* e comprimento em *cm*.

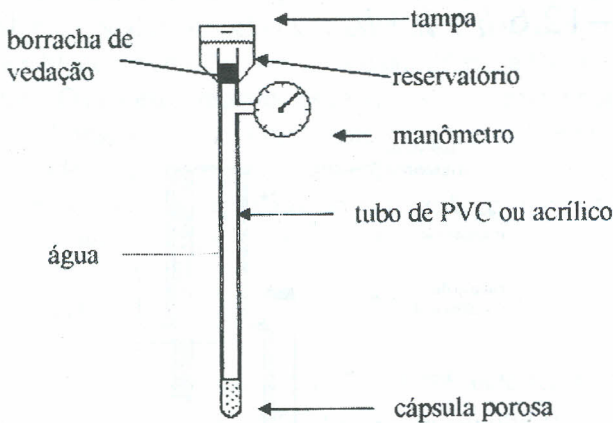


Figura 2.24. Representação esquemática de um tensiômetro com vacuômetro mecânico.

Reflectometria no Domínio de Tempo (TDR)

Alguns equipamentos de leitura do conteúdo de umidade do solo não possuem a característica de programabilidade e são conhecidos como

equipamentos dedicados, efetuando a leitura de apenas um tipo específico de sensor. Por serem dedicados podem possuir maior qualidade na leitura e ou um custo mais acessível. Um dos exemplo desses sistemas é a leitura de tempo de decaimento de um sinal ou o tempo de retorno de um pulso elétrico. O processo de leitura desse tipo de sensor inicia-se com a emissão de um sinal de onda quadrada ou um pulso no solo através de um emissor. Esse sinal interage com o meio a ser medido e um sensor realiza a leitura do seu comportamento. O comportamento do sinal, que dependendo do nível de umidade do meio, é registrado e analisado apresentado ao usuário a correlação. Um caso típico é o sensor de Reflectância no Domínio do Tempo, mais conhecido como TDR (*Time Domain Reflectometer*) que emite um pulso na frequência de micro ondas. No caso de um TDR, o tempo de retorno do pulso é da ordem de décimos de segundos e a leitura deve ser efetuada a cada milésimo de segundos, aproximadamente. Leitura dessa ordem de grandeza não pode ser realizada manualmente e portanto é necessário um circuito elétrico apropriado para mostrar ao usuário dados devidamente convertidos em unidades de umidade através de mecanismos correlacionais.

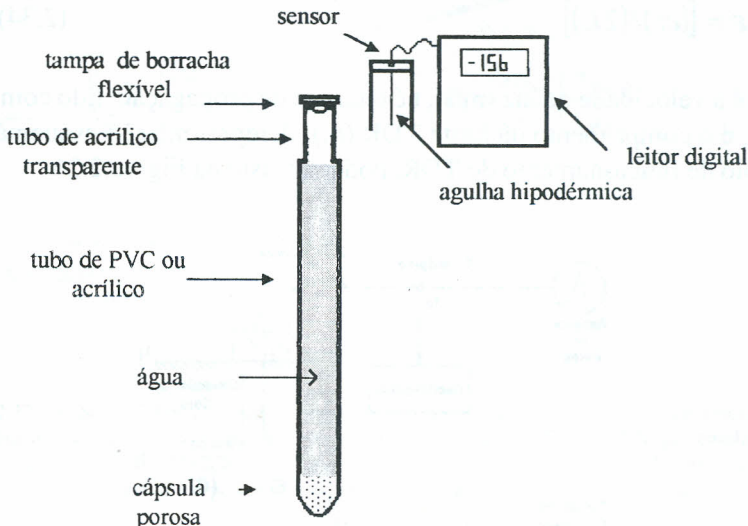


Figura 2.25. Representação esquemática de um tensiômetro com vacuômetro digital (tensímetro).

A reflectometria no domínio do tempo (TDR), como método de medida de umidade e condutividade elétrica do solo, vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros físico do solo. No final da

década de 60, FELLNER-FELDEGG, (1969) introduziu a técnica TDR como uma técnica para medir a permissividade dielétrica complexas de líquidos. A partir de então, a técnica TDR tem sido aplicada nas medidas de propriedades dielétricas de muitos outros materiais, inclusive o solo. A utilização da técnica TDR, na investigação das propriedades física do solo foi introduzida em 1980 por Topp e colaboradores. Desde então grandes avanços têm sido obtidos para a sua sedimentação como metodologia para caracterizar e medir do ponto de vista físico, o estado da água em meios porosos, a concentração de soluto e o potencial matricial (CONCIANI, et al. 1995; TORRE-NETO, et al., 1995; BISCEGLI, et al., 1996).

Para a medida da umidade utiliza-se um testador de cabo, que mede variações no tempo de propagação de um trem de pulso, provocada por discontinuidades na linha de transmissão ou sonda. A discontinuidade é causada pela mudança no valor da constante dielétrica no sistema solo-água. O testador de cabos lê o tempo de propagação da onda. A equação que relaciona o tempo com a constante dielétrica (ϵ) pode ser vista na equação 2.34.

$$\epsilon = [(ct)/(2L)] \quad (2.34)$$

onde c é a velocidade da luz (m/s), t é o tempo de propagação, lido com o TDR (s), e L é o comprimento da haste TDR (m). A representação esquemática do princípio de funcionamento do TDR, pode ser visto na Figura 2.26.

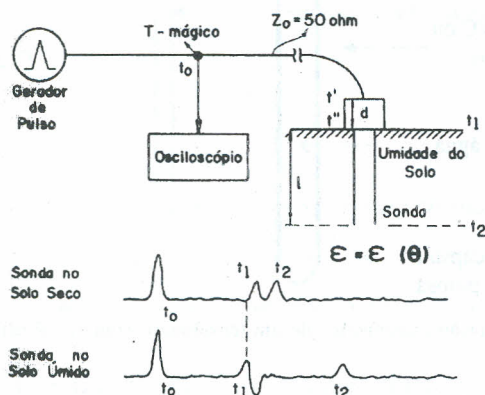
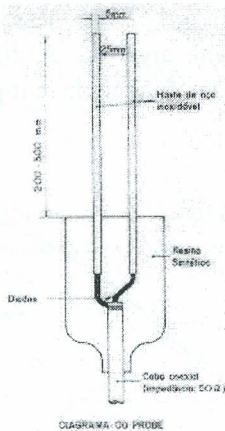


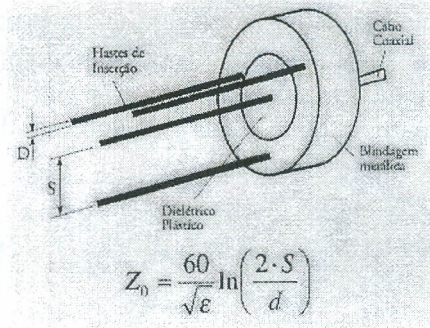
Figura 2.26. Representação esquemática do princípio de funcionamento do sistema TDR, para detecção do tempo de deslocamento do pulso na sonda. O gráfico mostra o comportamento do sinal do TDR para solo seco e úmido, respectivamente.

Sondas TDR

Para a medida de umidade do solo, distintos tipos de sonda podem ser utilizadas, as quais são: sondas de cabo paralelo e as que emulam cabo coaxial. A Figura 2.27a mostra no detalhe as dimensões de uma sonda com cabo paralelo, como também a equação da impedância que permite obter os valores do espaçamento (s) e do diâmetro (d) da haste. A Figura 2.27b mostra a sonda que emula cabo coaxial, como também a equação para cálculo da impedância da sonda. A mesma é construída com 4 hastes, sendo 3 hastes consideradas a blindagem ou negativo e uma haste central como o positivo.



$$Z_0 = (120\sqrt{\epsilon})^{1/2} \ln \left(\frac{2 \cdot S}{d} \right) \quad (a)$$



$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left(\frac{2 \cdot S}{d} \right)$$

(b)

Figura 2.27. (a) Sonda TDR com hastes paralelas. No detalhe as dimensões do espaçamento (S) e do diâmetro (d) em mm, as quais são características da sonda. (b) Sonda TDR que emula cabo coaxial. As dimensões do espaçamento (S) e do diâmetro (d), determinam o valor da impedância (Z_0). As equações permitem calcular o valor de Z_0 para ambas as sondas.

As sondas que emulam cabo coaxial têm a vantagem de possuírem a menor perda do sinal, devido ao menor valor de impedância e devido ao confinamento da propagação da onda eletromagnética, por todo o comprimento da haste (ZEGELIN et al., 1989; CRESTANA, 1994; HERMANN et al., 1995).