

73

Circular Técnica

Campina Grande, PB
Dezembro, 2003

Autores

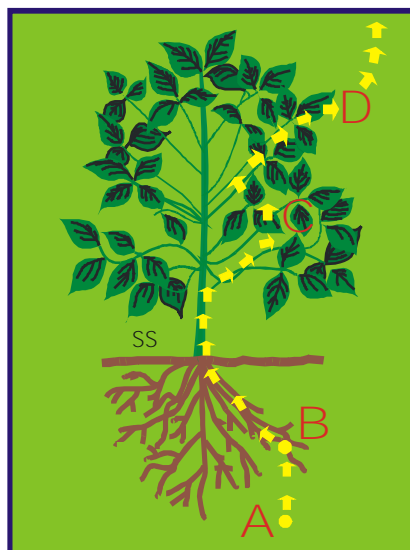
Aurelir Nobre Barreto
M.Sc., Engº Agrº da Embrapa
Algodão, Rua Osvaldo Cruz,
1143-Centenário 58107-720 -
Campina Grande, PB
e-mail:
aurelir@cnpa.embrapa.br

José Américo do Amaral
Bordini
D.Sc., Engº Agrº da
Embrapa Algodão
e-mail:
bordini@cnpa.embrapa.br

Elias Fernandes de Sousa
D.Sc., Engº Agrícola, Prof. de
irrigação da Universidade
Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro



Avaliação da Demanda Hídrica das Culturas Irrigadas: Estudo de Caso - Algodão Herbáceo, Amendoim, Girassol e Coco



Para o cálculo do suprimento de água às plantas por meio da irrigação, são adotadas três metodologias distintas ou a integração delas, assim descritas: demanda climática ou atmosférica; monitoramento da umidade no solo e medida direta da água na planta.

A programação adequada dos eventos de irrigação consiste em suprir as necessidades de água e nutrientes nos diferentes estádios de desenvolvimento da planta.

A economia de água nos diversos sistemas de irrigação começa com a otimização do manejo na parcela agrícola. Assim, a adoção de procedimentos e metodologias racionais pode contribuir para a economia dos recursos hídricos, energia elétrica e mão-de-obra, pois a quantidade de água a ser aplicada à cultura depende da demanda climática ou atmosférica, da fase fenológica da planta, da eficiência de aplicação do sistema de irrigação utilizado e da capacidade de armazenamento de água no solo.

Neste trabalho consideram-se os seguintes parâmetros: 1) medidas climáticas - a evapotranspiração de referência (ET_o), o coeficiente de correção do consumo de água pela cultura (K_c), e o coeficiente de redução da evapotranspiração da cultura (K_r), que deve ser aplicado no cálculo da demanda hídrica das fruteiras; 2) medidas no solo - aspectos físico-hídricos no manejo de irrigação, com ênfase na disponibilidade de água no perfil do solo, e no monitoramento de umidade por meio da TDR (reflectometria no domínio do tempo); 3) medidas na planta - potencial hídrico na folha, porometria, termometria da folha e monitoramento do fluxo de seiva.

Atualmente, de acordo com Faria (1998), existem esforços no sentido de se empregar a informação de reflectância como um substituto para o K_c convencional, o que torna é provável o uso crescente de métodos meteorológicos para a determinação da evapotranspiração das culturas (ET_c).

A ênfase na TDR é justificada pela praticidade que essa metodologia instrumental oferece em relação aos outros métodos de monitoramento de umidade do solo, tais como: método gravimétrico (estufa), sonda de nêutrons, sonda de raios gama, blocos porosos, tensiômetros, e termômetros infra-vermelhos. Faria (1998) menciona e detalha algumas das metodologias e instrumentos utilizados no monitoramento

de umidade do solo.

O objetivo desta publicação é apresentar alternativas de manejo de água no cultivo das culturas irrigadas em qualquer estágio de desenvolvimento da planta, região do país, período do ano e classe textural de solo, pois a competitividade pelo uso dos recursos hídricos está cada vez maior. Barreto & Luz (2003) mencionam três grandes demandas no consumo de água no planeta: uso urbano ou doméstico, uso industrial e uso agrícola, sendo que a agricultura irrigada, direta ou indiretamente é responsável pelo maior consumo de água no Brasil e no mundo.

De acordo com James (1988) citado por Silva et al. (1998) são adotados diferentes procedimentos que consideram o *status* de água em um ou mais componentes do sistema solo-planta-atmosfera, a saber: medidas climáticas, medidas no solo e medidas na planta.

1. Medidas climáticas

A coleta de dados climáticos estudados pelas ciências atmosféricas quando aplicados em prol da agricultura irrigada tem sido bastante útil no mundo todo, pois a interação de diversos fatores determina o consumo de água pelas plantas.

Neste item aplicam-se cinco exemplos de cálculo com base em fatores de demanda atmosférica como método estimativo da necessidade hídrica das culturas.

Os dois primeiros exemplos aplicam-se ao coqueiro (*Cocos nucifera* L.), utilizando-se a ET_0 , o coeficiente da cultura (k_c) e o coeficiente de redução da evapotranspiração da cultura (k_r), diferenciado para sete estádios fenológicos como base de cálculo para duas diferentes regiões do país (Tabelas 1 e 2).

No terceiro exemplo, toma-se a cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), utilizando-se a ET_0 e a curva de k_c diferenciada por fase fenológica da planta (Tabela 3).

Na Tabela 4, encontra-se a variação e distribuição do consumo de água do algodoeiro herbáceo no município de Barreiras, Ba.

O quarto exemplo contempla a cultura do amendoim (*Arachis hypogaea* L.), aplicando-se medidas climáticas para o cálculo do consumo hídrico dessa leguminosa, (Tabela 5).

E, no 5º exemplo calcula-se a demanda hídrica para as variedades de girassol (*Helianthus annuus* L.),

cultivadas na região Meio-Norte do Brasil, envolvendo os seguintes parâmetros atmosféricos: ET_0 diária do município de Teresina obtidas a partir das normais climatológicas (SECRETARIA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, 1992), do coeficiente Köpen ($k_p = 0,85$), e do k_c diferenciado por fase fenológica fornecidos por Doorenbos & Kassam (1994).

A evapotranspiração de uma cultura (ET_c), é normalmente expressa em termos de altura de água transferida para a atmosfera em toda a área cultivada. Em caso de áreas com cobertura incompleta, como no cultivo das fruteiras, a evapotranspiração não ocorre em toda a área disponibilizada para a planta.

Assim, quando se utilizam medidas atmosféricas para o cálculo da demanda de água evapotranspirada pela cultura (ET_c), na área de projeto, deve ser considerado, além do coeficiente da cultura, (k_c), o coeficiente de redução da evapotranspiração, (k_r), o qual ajusta a área de evapotranspiração às condições de campo e representa a porcentagem da área efetivamente coberta pela planta.

A equação 1 permite o cálculo do volume de água requerido pela cultura, em $L.planta.dia^{-1}$, de forma direta e sem transformação de unidades.

$$Vol = ET_0 \cdot k_c \cdot k_r \cdot A \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

Vol - volume de água aplicado por planta ($L.dia^{-1}$);

ET_0 - evapotranspiração de referência ($mm.dia^{-1}$);

k_c - coeficiente da cultura para correção da evapotranspiração (0,80 para o coqueiro adulto);

k_r - coeficiente de redução da evapotranspiração (relação entre área de solo sombreada e área disponível para a planta);

A - área efetivamente disponível para cada planta (m^2).

Os cálculos para elaboração da Tabela 1 têm como referência, a evaporação do tanque classe A (ECA) corrigida pelo coeficiente de Köpen ($k_p = 0,85$). Quando se dispõe da evapotranspiração de referência (ET_0), medida diretamente por meio de uma estação meteorológica automática em operação na localidade mais próxima da área irrigada (válido até um raio de 100 km), calcula-se a demanda hídrica a partir dos dados obtidos por esse instrumento, como no segundo exemplo do coqueiro.

Nos resultados apresentados na Tabela 1 levaram-se em conta sete estádios de crescimento do coqueiro com relação à área de cobertura do solo e seus respectivos coeficientes de redução da evapotranspiração, kr (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70), da fase jovem até a fase adulta, tendo-se adotado o valor 0,80 para o coeficiente da cultura, (kc), recomendado por Nogueira et al. (1998) e também uma área de 48,8 m² disponível para a planta.

A Tabela 1 contém, portanto, os valores da variação da demanda hídrica diária do coqueiro anão-verde, estimados por meio de parâmetros atmosféricos para as condições climáticas dos Tabuleiros Costeiros de Sergipe, com base nos dados de variação mensal das normais climatológicas (SECRETARIA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, 1992).

O primeiro bloco de valores apresentado na Tabela 1 representa a necessidade líquida para suprimento de água ao coqueiro anão-verde, por meio da técnica de irrigação e na ausência de precipitações pluviais. Consideram-se sete fases de crescimento ou de porcentual de cobertura do solo pela cultura, de 10% até 70%. No segundo bloco, os volumes estão acrescidos em 10% para compensação das perdas, que são de ocorrência comum, mesmo em sistemas de irrigação localizados.

Observa-se, na última coluna do segundo bloco de valores, para o kr de 0,70 (fase adulta do coqueiro), que os meses de janeiro, fevereiro e março apresentam o maior consumo bruto de água na fase adulta do coqueiro (117; 117; e 103 L. planta.dia⁻¹, respectivamente) nos Tabuleiros Costeiros de Sergipe. O menor valor de consumo hídrico é verificado no período de abril a agosto, com

demanda de 91, 88, 86, 88 e 97 L.planta.dia⁻¹. A partir de setembro a demanda volta a crescer com consumos de 102, 105, 109 e 102 na sequência dos meses, respectivamente (Tabela 1).

Na Tabela 2 estão estimados os valores da quantidade de água diária a ser aplicada para atender à necessidade hídrica do coqueiro anão-verde, com base nos dados médios da ETo do município de Campos dos Goytacazes, RJ, calculada pelo método de Penman. Verifica-se a tendência de consumo hídrico reduzido durante o trimestre maio, junho e julho, com demanda diária de 98, 84 e 91 L, respectivamente, o que mostra necessidade da quantificação da água a ser fornecida à cultura para o correto manejo e programação de irrigação do coqueiro e outras fruteiras.

O terceiro exemplo aplicado à demanda atmosférica contém os valores diários da necessidade hídrica do algodoeiro herbáceo no município de Barreiras, BA. Barreto et al. (2003) utilizaram como base de cálculo a ETo (obtida a partir das normais climatológicas), e o kc (diferenciado e segmentado por fase do algodoeiro), considerando um período de 100 dias de irrigação (Figura 1). Assim, a estimativa de consumo de água ou da evapotranspiração da cultura (ETc) pode ser aplicada para qualquer duração da estação de cultivo do algodoeiro ao longo do ano.

Os resultados apresentados na Tabela 3 quantificam as oscilações na demanda temporal e por fase de desenvolvimento da cultura, uma vez que no ambiente atmosférico a dinâmica de fluxo de água é função conjunta dos fatores climáticos da região.

Considerando-se os meses de maior demanda evapotranspirométrica na região, que são julho,

Tabela 1. Estimativa da quantidade de água diária a ser aplicada ao coqueiro anão-verde em sete fases fenológicas considerando-se a ETo, o kc e o kr e a área, A de 48,8 m², para as condições climáticas dos Tabuleiros Costeiros de Sergipe.

Mês	ECA* (mm.dia ⁻¹)	ETo (mm.dia ⁻¹)	Volume Líquido Aproximado (L. Planta.dia ⁻¹)							Volume Bruto Aproximado (L. Planta.dia ⁻¹)**						
			0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
Jan	4,5	3,8	15	27	45	60	75	90	105	17	30	50	67	83	100	117
Fev	4,4	3,8	15	27	45	60	75	90	105	17	30	50	67	83	100	117
Mar	4,1	3,4	13	26	40	53	66	80	93	14	29	44	59	73	89	103
Abr	3,5	3,0	12	23	35	47	58	70	82	13	25	39	52	64	78	91
Mai	3,4	2,9	11	22	34	45	56	67	79	12	24	38	50	62	74	88
Jun	3,3	2,8	11	22	33	44	55	66	77	12	24	37	49	61	73	86
Jul	3,4	2,9	11	22	34	45	56	67	79	12	24	38	50	62	74	88
Ago	3,7	3,2	12	25	37	50	62	74	87	13	28	41	55	69	82	97
Set	4,0	3,4	13	26	40	53	66	79	92	14	29	44	59	73	88	102
Out	4,0	3,5	14	27	41	54	68	81	95	16	30	45	60	75	90	105
Nov	4,2	3,6	14	28	42	56	70	84	98	16	31	47	62	78	93	109
Dez	4,0	3,4	13	26	39	53	66	79	92	14	29	43	59	73	88	102

*Evaporação do tanque classe A; ** Eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação localizada, $E_a = 90\%$

Base de cálculo: $ETo = ECA \cdot 0,85$, $Vol = ETo \cdot kc \cdot kr \cdot A$

Tabela 2. Estimativa da quantidade de água diária a ser aplicada ao coqueiro anão-verde em sete fases fenológicas, considerando-se a ETo, o kc e o kr e a área, A de 48,8 m², para a Região Norte Fluminense.

Mês	ET _o * (mm.dia ⁻¹)	Volume Líquido Aproximado (L. Planta.dia ⁻¹)							Volume Bruto Aproximado (L. Planta.dia ⁻¹)* *						
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
Jan	5,6	22	44	66	88	110	132	154	24	45	73	98	122	147	171
Fev	6,0	23	46	69	92	115	138	161	26	52	78	104	130	156	179
Mar	4,9	19	38	57	76	95	114	133	21	42	63	84	105	126	147
Abr	4,0	16	32	48	64	80	96	112	18	36	54	72	90	108	126
Mai	3,4	13	26	39	52	65	78	91	14	28	42	56	70	84	98
Jun	2,9	11	22	33	44	55	66	77	12	24	36	48	60	72	84
Jul	3,0	12	24	36	48	60	72	84	13	26	39	52	65	78	91
Ago	3,7	14	28	42	56	70	84	98	16	32	48	64	80	96	112
Set	4,1	16	32	48	64	80	96	112	18	36	54	72	90	108	126
Out	4,6	18	36	54	72	90	108	126	20	40	60	80	100	120	140
Nov	5,2	20	40	60	80	100	120	140	22	44	66	88	110	132	154
Dez	5,1	20	40	60	80	100	120	140	22	44	66	88	110	132	154

* Com base no método de Penman; ** Eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação localizada, Ea = 90%)

Base de cálculo: Vol = ET_o . kc . kr . A

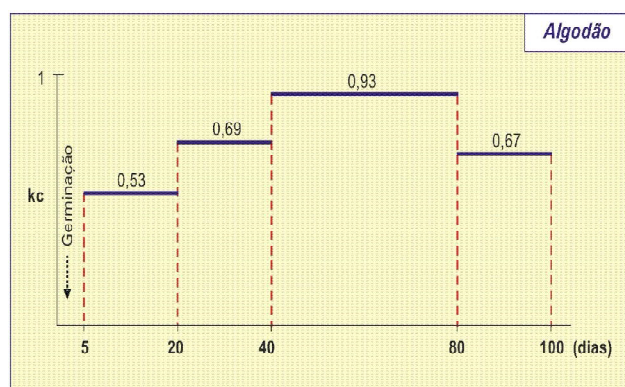


Fig. 1. Aspectos dos segmentos de kc para as fases fenológicas do algodoeiro herbáceo, considerando-se um período de cultivo de 100 dias de irrigação. Adaptado de Bezerra et al. (1992).

agosto, setembro e outubro (Tabela 3) e um período de 100 dias de aplicação de água para irrigação, iniciando no primeiro dia do mês de julho, tem-se a seguinte evapotranspiração total da cultura (ETc), para cada fase do algodoeiro, assim distribuídas na Tabela 4.

A aplicação do quarto exemplo de cálculo contempla a cultura do amendoim (*Arachis hypogaea* L.), a partir do kc diferenciado por fase da cultura com base nos dados de Doorenbos & Kassam (1994), que fornecem a variação temporal do kc para as fases: inicial, de desenvolvimento, período intermediário e fase final do ciclo do amendoim (Figura 2).

Aplicando-se os valores de kc recomendados por

Tabela 3. Estimativa da necessidade hídrica diária do algodoeiro herbáceo, em função da demanda atmosférica mensal, do município de Barreiras, BA, e do kc.

Mês	ET _o (mm.dia ⁻¹)	Demanda de água (mm.dia ⁻¹)*			
		Fase I Kc = 0,53	Fase II Kc = 0,69	Fase III Kc = 0,93	Fase IV Kc = 0,67
Janeiro	2,3	1,2	1,6	2,1	1,5
Fevereiro	2,3	1,2	1,6	2,1	1,5
Março	2,2	1,2	1,5	2,0	1,8
Abril	2,2	1,2	1,5	2,0	1,8
Maio	2,9	1,5	2,0	2,7	2,0
Junho	4,0	2,1	2,8	3,7	2,5
Julho	4,8	2,5	3,3	4,5	3,2
Agosto	6,1	3,2	4,2	5,7	4,1
Setembro	6,6	3,5	5,5	6,1	4,4
Outubro	4,9	2,6	3,4	4,6	3,3
Novembro	3,2	1,7	2,2	3,0	2,1
Dezembro	2,4	1,3	1,7	2,2	1,6

*Para atender à demanda total deve ser considerada a eficiência de aplicação de água de cada sistema de irrigação, Ea. Para os sistemas de aspersão, sugere-se Ea = 70%.

Obs.: Parâmetros de cálculo com base nas Normais Climatológicas de Barreiras, BA.

Tabela 4. Variação e distribuição do consumo de água do algodoeiro herbáceo no município de Barreiras, BA, no período de maior demanda (BARRETO et al. 2003).

Fase fenológica	Duração da fase no mês (dia)	Consumo no período (dias x mm)	Consumo total (mm)
I	20 (jul)	20 x 2,5	50,0
II	11 (jul) + 9 (ago)	11 x 3,3 + 9 x 4,2	74,1
III	22 (ago) + 18 (set)	22 x 5,4 + 18 x 6,1	228,6
IV	12 (set) + 8 (out)	12 x 4,4 + 8 x 3,3	79,2
Ciclo de irrigação	100	-	431,9

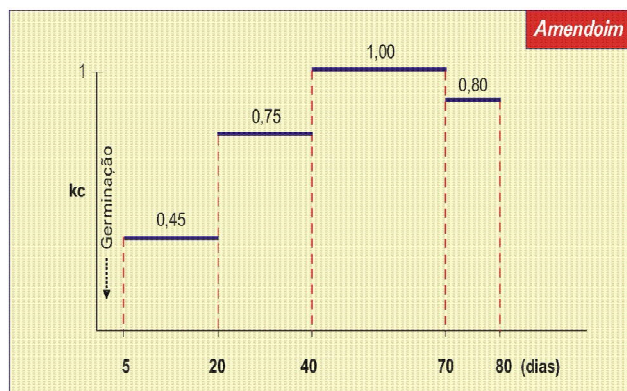


Fig. 2. Aspectos dos segmentos de kc para as fases fenológicas do amendoim, considerando-se um período de cultivo de 80 dias de irrigação.

Adaptado de Doorenbos & Kassam (1994).

Doorenbos e Kassam (1994) para a cultura do amendoim, gerou-se a Tabela 5.

A Tabela 5 contém um exemplo aplicado aos aspectos da variação do consumo de água, diferenciado por fase da cultura do amendoim, na região de Rodelas, BA, considerando-se o período climático de maior demanda atmosférica (outubro,

novembro e dezembro), e um período de 80 dias de irrigação.

A Figura 3 caracteriza as variações do kc recomendado por Doorenbos & Kassam (1994) para as fases fenológicas do girassol.

A Tabela 6 resulta da aplicação dos valores de kc recomendados por Doorenbos e Kassam (1994) para a cultura do amendoim.

A necessidade hídrica diária para a cultura do girassol na Região Meio Norte do Brasil está calculada na Tabela 7.

A Tabela 8 contém um exemplo aplicado aos aspectos da variação do consumo de água, diferenciado por fase da cultura do girassol, com ênfase nos genótipos citados por Ribeiro (1998), avaliados na região Meio-Norte do Brasil, no período de 1988 a 1997 e relacionados na Tabela 9. Considerou-se a estação de cultivo para o período climático de maior demanda atmosférica (agosto, setembro e outubro), um período de irrigação de 90 dias.

Tabela 5. Estimativa da necessidade hídrica diária do amendoim, em função da demanda atmosférica mensal da região de Rodelas, BA, e do kc.

Mês	ETo (mm.dia ⁻¹)	Demanda de água (mm.dia ⁻¹)*			
		Fase Inicial Kc = 0,45	Desenvolvimento Kc = 0,75	Intermediária Kc = 1,00	Fase final Kc = 0,80
Janeiro	7,6	3,4	5,7	7,6	6,1
Fevereiro	6,8	3,1	5,1	6,8	5,4
Março	5,9	2,7	4,4	5,9	4,7
Abril	5,0	2,3	3,8	5,0	4,0
Maio	4,4	2,0	3,3	4,4	3,5
Junho	3,7	1,8	2,8	3,7	3,0
Julho	3,8	1,7	2,9	3,8	3,0
Agosto	5,3	2,4	4,0	5,3	4,2
Setembro	6,9	3,1	5,2	6,9	5,5
Outubro	8,3	3,7	6,2	8,3	6,6
Novembro	8,8	4,0	6,6	8,8	7,0
Dezembro	7,7	3,5	5,8	7,7	6,1

*Para atender à demanda total deve ser considerada a eficiência de aplicação de água de cada sistema de irrigação (Ea). Para os sistemas de aspersão, sugere-se Ea = 70%.

Obs.: Parâmetros de cálculo com base nas Normais Climatológicas de Paulo Afonso, BA.

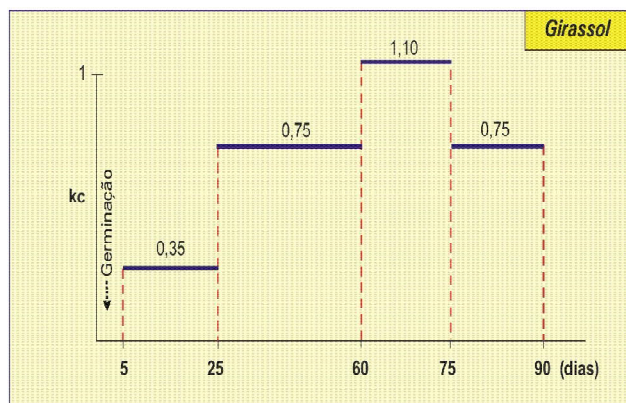


Fig. 3. Aspectos dos segmentos de k_c para as fases fenológicas do girassol, considerando-se um período de cultivo de 90 sob irrigação.

Adaptado de Doorenbos & Kassam (1994).

2. Medidas no solo

O monitoramento da umidade do solo na zona padrão de distribuição e absorção de água pelas raízes é outra forma de cálculo para o suprimento de água à planta, com base em aspectos físicos do solo para o manejo otimizado da irrigação.

Ø Aspectos físico-hídricos no manejo de irrigação

A equação 2 permite estimar a quantidade de água (em volume ou em altura) a ser reposta ao solo em cada evento de irrigação em função de parâmetros físicos a dada profundidade do perfil de solo.

$$h = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Ds \cdot Z \cdot Fr \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

h - altura de água a ser aplicada à cultura (mm);

CC - capacidade de campo (%)

PMP - ponto de murcha permanente (%);

Ds - densidade do solo ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

Z - profundidade para reposição de água até à capacidade de campo (mm);

Fr - fator de reposição ou de disponibilidade de água (decimal, < 1).

Ayers & Westcot (1991) apresentam o padrão de extração normal de água num perfil de solo como sendo uma proporcionalidade volumétrica sequencial decrescente segundo a ordem porcentual de 40%,

Tabela 6. Variação e distribuição do consumo de água do amendoim na região de Rodelas, BA, no período de maior demanda.

Fase fenológica	Duração da fase no mês (dia)	Consumo no período (dias x mm)	Consumo total (mm)
Fase inicial	15 (out)	15 x 3,7	55,5
Desenvolvimento	16 (out) + 4 (nov)	16 x 3,7 + 4 x 6,2	84,4
Intermediária	26 (nov) + 9 (dez)	26 x 8,8 + 9 x 7,7	298,1
Fase final	10 (dez)	10 x 6,1	61,0
Ciclo de irrigação	80	-	498,5

Tabela 7. Cálculo da necessidade hídrica diária do girassol, em função da demanda atmosférica mensal da região Meio-Norte do Brasil, e do k_c .

Mês	ETo ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$)	Demanda de água ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) *			
		Fase Inicial $Kc = 0,35$	Desenvolvimento $Kc = 0,75$	Intermediária $Kc = 1,10$	Fase final $Kc = 0,75$
Janeiro	2,5	0,9	1,9	2,8	1,9
Fevereiro	2,0	0,7	1,5	2,2	1,5
Março	2,0	0,7	1,5	2,2	1,5
Abril	1,7	0,6	1,3	1,9	1,3
Maio	2,1	0,7	1,6	2,3	1,6
Junho	3,2	1,1	2,4	3,5	2,4
Julho	4,6	1,6	3,5	5,1	3,5
Agosto	5,3	1,9	4,0	5,8	1,8
Setembro	5,8	2,0	4,3	6,4	4,3
Outubro	6,9	2,4	5,2	7,6	5,2
Novembro	5,2	0,9	3,9	5,7	3,9
Dezembro	3,9	1,8	2,9	4,3	2,9

*Para atender à demanda total deve ser considerada a eficiência de aplicação de água de cada sistema de irrigação (Ea). Para os sistemas de aspersão, sugere-se $Ea = 70\%$.

Obs: Parâmetros de cálculo com base nas Normais Climatológicas de Teresina, PI.

Tabela 8. Variação e distribuição do consumo de água do girassol na região Meio-Norte do Brasil, no período de maior demanda.

Fase fenológica	Duração da fase no mês (dia)	Consumo no período (dias x mm)	Consumo total (mm)
Fase inicial	20 (agosto)	20 x 1,9	38,0
Desenvolvimento	11 (ago) + 29 (set)	11 x 4,0 + 29 x 4,3	168,7
Intermediária	1 (set) + 14 (out)	1 x 6,4 + 14 x 7,6	112,8
Fase final	15 (out)	15 x 5,2	78,0
Ciclo de irrigação	90	-	397,5

Tabela 9. Materiais genótipos de girassóis avaliados na região Meio-Norte do Brasil em regime de sequeiro, quantificando duas fases fenológicas (floração e maturação, e outras características de fatores de produção (RIBEIRO, 1998).

Genótipos ¹	Floração Inicial (dia)	Maturação Fisiológica (dia)	Altura de Planta (cm)	Peso de 1000 Sementes (g)	Teor de óleo (%)	Produtividade (kg/ha)
M 736	57	90	157	47,5	41,29	2.064
Rumbosol 91	68	97	170	53,0	39,40	1.939
Contiflor 7	58	91	155	51,1	40,17	1.915
Contiflor 3	57	90	151	54,7	34,89	1.845
AS 243	58	91	158	57,5	42,72	1.827
M 734	58	90	151	56,9	40,96	1.780
Rumbosol 90	58	93	165	50,2	43,42	1.768
M 742	55	88	131	63,4	42,05	1.765
GV 37017	57	88	148	52,2	40,82	1.757
Cargill 9303	58	95	178	50,1	41,37	1.745
M 738	56	88	148	61,3	41,01	1.743
DK 180	59	92	165	54,7	37,60	1.607
S 430	62	94	176	61,6	38,54	1.673
Cargill 9302	57	93	171	50,6	41,28	1.672
AS 603	58	91	155	53,2	47,04	1.670
Cargill 11	56	88	151	49,9	42,76	1.668
M 737	55	87	145	49,6	44,54	1.662
M 733	55	91	135	48,5	38,00	1.646
AS 238	56	86	152	49,8	44,18	1.644
Pioneer XF 3617	59	91	169	45,5	41,72	1.631
Cargill 9402	55	95	182	49,8	40,98	1.603
AS 470	58	92	163	45,5	42,35	1.600
DK 190	62	93	169	48,0	39,86	1.566
Cargill 9101	58	89	178	57,8	40,11	1.566
M 735	59	91	184	42,0	39,45	1.542
AS 226	55	88	167	49,4	39,43	1.539
Cargill 9201	62	94	207	49,0	43,50	1.525
Embrapa 122	52	84	149	57,1	40,51	1.520
Cargill 9301	54	90	149	45,3	40,06	1.513
Pioneer 6510	59	92	159	42,8	35,08	1.509
Viki	61	91	157	53,0	40,95	1.505
M 731	59	93	162	45,0	38,45	1.500
Cargill 3	57	88	150	48,0	43,93	1.500
Média	58	91	161	51,3	40,86	1.658

¹Genótipos com produtividade média igual ou superior a 1.500 kg.ha⁻¹, em condição de sequeiro.

30%, 20% e 10%. Neste padrão entende-se que 40% da evapotranspiração da cultura, (ET_c), são extraídos no primeiro quarto superior da zona radicular, 30% do segundo, 20% do terceiro e 10% do quarto inferior na sequência do perfil de solo. Este tipo de distribuição espacial de água no solo, também chamado padrão 4, 3, 2, 1 (Figura 4) considera um bulbo umedecido em forma de cone, principalmente no caso da aplicação de água por microaspersor, em que a pluviosidade diminui ao longo do raio de alcance do jato aspergido sobre a superfície do solo com conseqüente redução da

infiltração na periferia do círculo de ação dos emissores.

As equações 3, 4 e 5 permitem estimar o volume de um cone, o volume aproximado de água que pode ser armazenada num perfil de solo em formato de cone de acordo com o padrão de distribuição 4, 3, 2, 1 e da capacidade de campo; e o volume de água de reposição em cada evento de irrigação, conforme o fator de reposição (Fr).

O teor de água no solo influencia uma série de

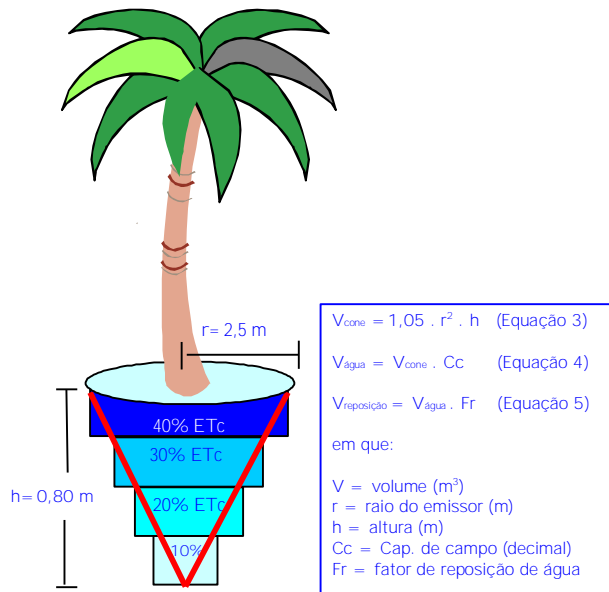


Fig. 4. Aspecto da proporcionalidade 4, 3, 2, 1 de distribuição e consumo de água pela planta num perfil de solo após um evento de irrigação por microaspersão. Adaptado de Ayers & Westcot (1991).

efeitos sobre as plantas, afetando o seu potencial biológico de forma positiva ou prejudicando o seu potencial de rendimento. Numa forma didática e conceitual, a Figura 5 ilustra os aspectos dos potenciais e dos intervalos de umidade no solo em relação à capacidade de suprimento hídrico às plantas, bem como o esgotamento da água disponível (AD), consumo de água pelas plantas, (C), e recarga, (R), aplicada durante os eventos da

irrigação. Outros parâmetros para o cálculo da água de reposição, do manejo e da programação da irrigação, também são descritos.

O intervalo cotado no eixo das ordenadas entre qv_1 e qv_2 (Figura 5) representa o conteúdo volumétrico tangível (água disponível), ou volume de água útil, quando se compara o solo como sendo um reservatório de armazenamento de água nos espaços da porosidade estrutural, em que qv_1 e qv_2 representam o limite superior de reserva facilmente utilizável (LSRFU) e o limite produtivo (Lp), respectivamente.

O conceito de intervalo hídrico ótimo está baseado nas práticas de reposição de água ao solo dentro de uma frequência tal que atenda às necessidades hídricas das plantas em tempo hábil, ou seja, antes que elas sofram os efeitos de deficits hídricos.

O status de umidade no solo prejudica o metabolismo dos fitossistemas quando ocorre escassez ou excesso na zona padrão de extração de água pelo sistema radicular. O teor de água entre θ_{v2} e θ_{PMP} (Ponto de murcha permanente), intervalo correspondente à umidade textural (Figura 5), pode comprometer o rendimento de uma cultura quando o fator de reposição (Fr) se distancia do limite produtivo (Lp) e se aproxima do θ_{PMP} dentro da zona de risco, uma vez que esse intervalo é função do potencial matricial do solo (ψ_m) do próprio Fr e da textura do solo. No estado da saturação (θ_s) as plantas que necessitam de oxigenação na zona de

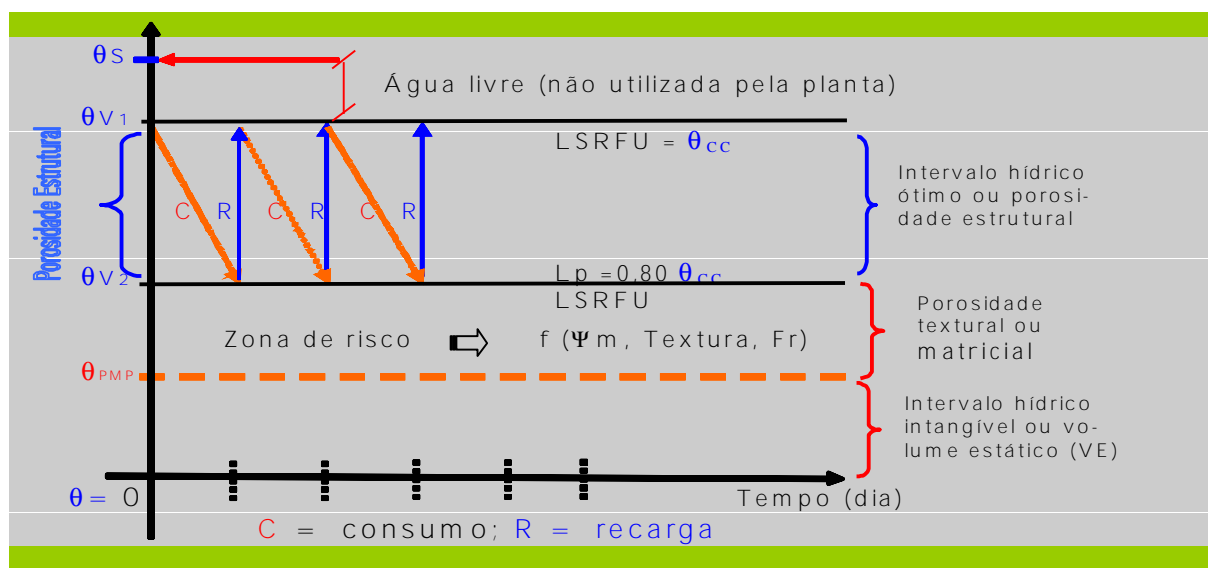


Fig. 5. Esquema da teoria clássica dos potenciais de umidade no solo em relação ao consumo de água pela planta e aos eventos de irrigação e parâmetros de cálculo com ênfase na física do solo.

raízes são afetadas negativamente, devido à anoxia. Períodos prolongados de saturação do solo, justificam a instalação de sistemas drenantes na área de cultivo para remover o excesso de água do perfil de solo e da área.

A parametrização dos elementos de cálculo para programação de irrigação e do manejo de água em áreas irrigadas, é um recurso técnico necessário para a economia dos recursos hídricos de uma região, mantendo a umidade do solo dentro do intervalo hídrico ótimo, sem possibilitar danos às culturas, causados pela escassez de água, como ilustra a Figura 2.

Ø Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

A reflectometria no domínio do tempo (TDR) utiliza a constante dielétrica (ϵ) da água para estimar o conteúdo de água do solo. Na faixa de frequência das ondas de rádio ($\cong 50$ MHz) a constante dielétrica da água é cerca de 80, a do ar é 1 e dos outros componentes varia de 2 a 4. Assim, uma medida da constante dielétrica do solo nesta faixa de frequência é uma boa medida do seu conteúdo de água.

Os trabalhos precursores nessa linha foram iniciados em 1980, com a aplicação da técnica para medir o conteúdo volumétrico de água em cinco tipos diferentes de solos, mostrando que o parâmetro que mais contribuiu nas variações da constante dielétrica foi o conteúdo de água do solo.

A técnica da TDR consiste da medida do tempo de trajeto de pulsos eletromagnéticos ao longo de uma linha de transmissão de duas, três ou mais hastes com comprimento conhecido. Este tempo gasto para a onda eletromagnética ir e voltar na linha de transmissão é relacionado à constante dielétrica (ϵ) do meio no qual a linha está inserida. De acordo com Faria (1998) a TDR apresenta grandes vantagens para a leitura e monitoramento do conteúdo de umidade no solo em relação a outros instrumentos, pelas seguintes razões:

- a) técnica não destrutiva;
- b) não utiliza radiação ionizante;
- c) alta precisão na leitura do conteúdo volumétrica de água no solo;
- d) baixo custo no acoplamento a um coletor de dados;
- e) é um instrumento portátil;
- f) mede o conteúdo de água nas direções vertical e horizontal.

Conciani et al. (1995); Torre Neto et al. (1995) e Biscegli et al. (1996) citados por Faria (1998), destacam o uso da técnica da DTR na pesquisa como metodologia para caracterizar e medir do ponto de vista físico, o estado da água em meios porosos, a concentração de solutos e o potencial matricial, inclusive no solo.

Algumas das vantagens da técnica de reflectometria no domínio do tempo são: a possibilidade da automatização, permitindo o monitoramento da umidade do solo com alta resolução, em escala temporal e espacial; a utilização para medidas simultâneas de conteúdo de água e condutividade elétrica no mesmo volume de amostra, tanto para medidas no campo como em colunas de solo no laboratório, principalmente onde os métodos de moderação de nêutrons e radiação gama se tornam inadequados.

Ø Equações para utilização da TDR

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem-se mostrado eficiente nas pesquisas de campo para monitorar a umidade no solo, que é o meio poroso de retenção e armazenamento de água no ambiente de raízes.

As equações a seguir possibilitam os cálculos da necessidade hídrica das culturas, por meio do monitoramento dos teores de água no solo:

$$\theta = \{ (\theta_s - \theta_r) / [1 + (10 \alpha \psi_m)^n]^m \} + \theta_r \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

θ , θ_s e θ_r - umidade volumétrica do solo, do solo saturado e residual, respectivamente, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

ψ_m - potencial matricial da água no solo, kPa

α , n e m - coeficientes da equação com valores de $0 < \alpha < 1$, $n > 1$, $0 < m < 1$.

O cálculo do tempo de irrigação é determinado em função das medidas da TDR, das características do solo e do sistema de irrigação (OTTO, 1998), com a utilização das seguintes equações:

$$Tr = 1 / Fr \quad \text{Equação 7}$$

$$\theta = a + b Tr + c Tr^2 \quad \text{Equação 8}$$

$$Ci = (z \cdot 60 Ee Ei Pm) / (Ei qe) \quad \text{Equação 9}$$

$$Ti = (\theta_{ls} - \theta) C_i \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

Tr - tempo de reflexão da onda eletromagnética, ms⁻¹;

Fr - frequência da onda eletromagnética, kHz;

q - umidade volumétrica do solo medida com o TDR, cm³cm⁻³;

a, b e c - coeficientes que antecedem à variável independente (Tr) da equação de regressão polinomial de 2º grau;

Ci - coeficiente de irrigação; min

z - espessura da camada de solo medida com o TDR, mm;

Ee - espaçamento entre emissores ao longo da linha lateral, m;

Ei - espaçamento entre linha lateral, m;

Pm - porcentagem de molhamento, decimal;

Ei - eficiência do sistema de irrigação, decimal;

qe - vazão média dos emissores, L h⁻¹;

Ti - tempo de irrigação, min; e

θ_{ls} - limite superior da umidade volumétrica do solo; cm³ cm⁻³.

Ø Instalação do equipamento

As hastes contendo as sondas de monitoramento da TDR devem ser instaladas na posição vertical no perfil do solo. A distância vertical entre as sondas podem ser planejadas em função da necessidade do monitoramento da umidade em profundidade (Figura 6).

Ø Manejo do equipamento - Figuras

Uma vez instaladas as hastes com as sondas, no campo, planeja-se o cronograma de leituras sistemáticas, na frequência desejada para fins de tomada de dados.

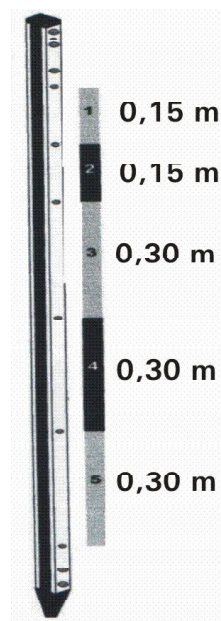


Fig. 6. Sonda da TDR tipo A PRB-A, modelo MP-917 da empresa E. S. I Environmental Sensors Inc; mostrando os segmentos e pontos de medida do teor de umidade do solo:

- 1 (0,0 - 0,15);
- 2 (0,15 - 0,30);
- 3 (0,30 - 0,60);
- 4 (0,60 - 0,90);
- 5 (0,90 - 1,20).

As leituras são feitas na tela do monitor portátil (aparelho) após a conectar-se os terminais elétricos aos encaixes da sonda instalada no solo. Os valores são lidos em percentual de umidade no solo em base volumétrica.

A Figura 7 permite a visualização do equipamento, incluindo os cabos de conexão com as sondas instaladas no campo.

3. Medidas na planta

Os meios tecnológicos de medição do teor de água nas plantas ainda não são utilizados pelos produtores irrigantes em nosso país, mas a pesquisa já dispõe de instrumentos para monitoramento, em campo, do status hídrico e da quantidade de água transpirada pelas plantas em tempo real, com base na fisiologia vegetal.

Os métodos disponíveis são: determinação do potencial hídrico na folha; porometria, ou seja, determinação da resistência à transpiração pela folha; termometria da folha por radiação infravermelha e monitoramento do fluxo de seiva xilemática.



Fig. 7. Equipamento utilizado para monitoramento da umidade do solo, indicando o painel com a tela de visualização das leituras.

Dentre os métodos apresentados anteriormente, o método da medição do fluxo de seiva das plantas vem se destacando na pesquisa e os resultados obtidos permitem adaptá-lo para a determinação do consumo de água da planta em tempo real e, também, para a automação de sistemas de irrigação.

Os métodos de monitoramento do fluxo de seiva podem, atualmente, ser divididos em três grupos: balanço de energia, pulso de calor e de dissipação térmica.

o Método de balanço de energia

O método de balanço de calor consiste na aplicação de uma quantidade conhecida de energia, em taxa constante, em torno de um segmento do caule da planta. Baseado na conservação de energia, a energia aplicada deverá ser igual ao somatório de toda energia que é armazenada no caule e é conduzida no sentido longitudinal e radial ao caule (Figura 8). Desta forma aplica-se a equação 11.

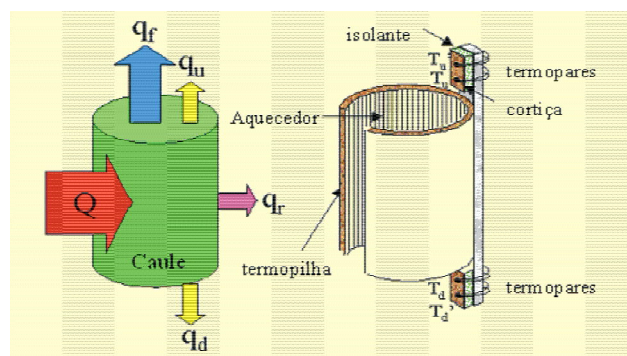


Fig. 8. Esquema do balanço de energia em um caule onde uma potência Q é aplicada e a estrutura de sensores projetada para medição de fluxo de seiva.

$$Q_{in} = q_f + q_v + q_r + q_s \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:

Q_{in} - energia aplicada em taxa constante, W;

q_f - energia carreada pelo fluxo de seiva, W;

q_v - energia conduzida no sentido longitudinal (para cima - q_u , e para baixo - q_d), W;

q_r - energia dissipada radialmente para o ambiente, W;

q_s - energia armazenada no caule, W.

Na prática, assume-se q_s pequeno e pode ser ignorada nas condições comumente encontradas para medição de fluxo de seiva. Medindo-se os fluxos Q_{in} , q_v e q_r por diferença, calcula-se q_f . Sendo q_f a energia conduzida pela seiva, esta quantidade de energia pode ser diretamente transformada em fluxo de massa, dividindo-se o seu valor pelo calor específico da água e pelo incremento de temperatura da seiva antes e após o aquecimento.

Este método, sendo baseado num processo físico de transferência de calor, não necessita de calibração e é utilizado em plantas com pequenos diâmetros de caule. A sua desvantagem está no fato de que aplica uma taxa constante de energia no caule, o que pode causar danos à planta por aquecimento, às vezes de forma irreversível.

o Método do pulso de calor

Este método consiste na aplicação, por intermédio de sonda inserida no caule, de um pulso de calor e o monitoramento da onda de calor gerada por meio de termopares instalados em sondas inseridas acima e abaixo da fonte de energia (Figura 9).

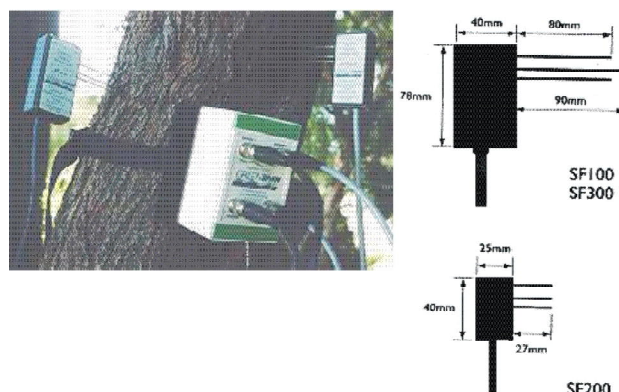


Fig. 9. Sistema instalado e esquema de sensores para medição de fluxo de seiva utilizando o pulso de calor.

A velocidade da seiva é determinada medindo-se a diferença de temperatura entre a sonda e o tempo gasto para que a temperatura se iguale a zero. Calcula-se o pulso de calor pela equação 12.

$$HPV = \frac{(x_s + x_i)}{2 t_o} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que:

HPV - velocidade do pulso de calor, cm h⁻¹;

x_s - distância da sonda acima da fonte de calor, cm;

x_i - distância da sonda abaixo da fonte de calor, cm;

t_o - tempo dispendido até que a diferença de temperatura se iguale a zero, h.

O fluxo de seiva na planta é calculado pela equação 13.

$$J = \frac{C}{s C_s} HPV \quad (\text{Equação 13})$$

Em que:

J - densidade de fluxo de seiva, cm.h⁻¹;

p - massa específica do caule, kg.m⁻³;

C - calor específico do caule, J.kg⁻¹ °C⁻¹;

p_s - massa específica da seiva, kg.m⁻³;

C_s - calor específico da seiva, J.kg⁻¹ °C⁻¹;

A vazão que passa pelo caule da planta pode ser estimada supondo-se homogeneidade das propriedades térmicas do caule da planta, pela equação 14.

$$F = J.S \quad (\text{Equação 14})$$

Em que:

F - vazão que passa pelo caule, cm³ h⁻¹;

S - seção do caule na posição do sensor, cm².

Ø Método de dissipação térmica

Este método consiste em duas sondas feitas de agulhas hipodérmicas, sendo que uma contém, em seu interior, uma resistência elétrica. Nas duas sondas é inserido um conjunto termopar que

possibilita a medição da diferença de temperatura entre elas. Essas sondas são inseridas no caule da planta (Figura 10) e a sonda com resistência é disposta à jusante, no sentido do fluxo de seiva. Uma vez instaladas, uma corrente elétrica contínua e estabilizada é fornecida à resistência, de tal forma a gerar uma diferença de temperatura entre as sondas. Quando não há fluxo, a diferença de temperatura é máxima. À medida que a planta transpira e há variação na densidade de fluxo de seiva no caule, a diferença de temperatura entre as sondas também varia.



Fig. 10. Detalhe mostrando a sonda de dissipação térmica instalada em caule de árvore.

As sondas são ligadas a um coletor automático de dados que fornece a tensão contínua necessária para o aquecimento da resistência elétrica da sonda (3 V) e armazena os dados de DT (medidos em milivoltagem) fornecidos pelas sondas. As leituras podem ser feitas a cada segundo e armazenadas em média de dez minutos.

A densidade de fluxo de seiva (u) (10⁻⁶ m³ s⁻¹ m⁻²) é calculada por meio de uma relação empírica determinada por Granier (1985), em que u é função de um termo k (Equação 15).

$$u = 119,003 \cdot k^{1,231} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

u - densidade de fluxo de seiva (10⁻⁶ m³ s⁻¹ m⁻²).

k - coeficiente de dissipação térmica.

O coeficiente de Granier (k), é calculado segundo a equação 16.

$$k = \frac{(\Delta T_{máx} - \Delta T)}{\Delta T_{máx}} \quad (\text{Equação 16})$$

Em que:

DT_{máx} - diferença de temperatura máxima, quando o fluxo de seiva é nulo.

DT - diferença de temperatura quando o fluxo de seiva é diferente de zero

Este método foi calibrado para árvores lenhosas e tem sido amplamente utilizado em pesquisa (Figura 10).

Conclusão e Recomendação

Conclui-se que os parâmetros climatológicos são bastante úteis e práticos para o cálculo estimativo de demanda hídrica e para a programação de irrigação.

De acordo com os resultados de cálculo aplicados nesse trabalho, conclui-se que é possível economizar água nas culturas irrigadas, utilizando-se algumas metodologias simples e outras complexas, a depender da adoção pelo produtor e dos recursos financeiros.

A aplicabilidade da instrumentação e automação no manejo da irrigação como prática agrícola são recursos tecnológicos avançados e necessários no mundo moderno, em que a agricultura de precisão está se tornando viável para o uso racional dos recursos hídricos.

Recomenda-se que a reposição de água ao solo, para atender às necessidades hídricas das culturas, deve ser administrada na quantidade certa, no momento oportuno e por meio do método adequado.

Referências Bibliográfica

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. Roma: FAO, 1991. 218p. (Estudos FAO: irrigação e drenagem, 29)

BARRETO, A. N.; LUZ, M. J. da S. e. Sede zero: um desafio hídrico para o 3º milênio. Disponível em: www.clubedofazendeiro.com.br. Acesso em: 08 de julho de 2003.

BARRETO, A. N.; BEZERRA, J. R. C.; SILVA, A. A. G. da. Cálculo da necessidade hídrica do algodoeiro com base na evapotranspiração de referência (ET_o) e no coeficiente da cultura (k_c) para Barreiras – BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 4., 2003. Goiânia, GO. Anais... Goiânia: Embrapa Algodão. CD-Rom.

BEZERRA, J. R. C.; AMORIM NETO, M. da S.; AZEVEDO, P. V.; RAMANA RAO, T. V.; SOBRINHO, J. E.; SILVA, M. B da. In: EMBRAPA ALGODÃO (Campina Grande, PB). Relatório técnico anual 1990/1991. Campina Grande, 1992. 533p

FARIA, M. A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. Manejo de irrigação para grandes culturas. Anais... Lavras: UFLA/SBEA, 1998. cap. 3, p. 239-280

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci. For. v.42, n.2, p.193-200, 1985.

NOGUEIRA, L. C; NOGUEIRA, L. R. Q; MIRANDA, F. R de. Irrigação do coqueiro In: FERREIRA, J. M. S; WARWICK, D. R. N; SIQUEIRA, L. A. (eds.) A Cultura do coqueiro no Brasil. 2. ed. ver. e apl. – Brasília – SPI; Aracaju: Embrapa - CPATC, 1998. p.159 –187.

OTTO, S. R. L. Manejo de irrigação com o TDR. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., Fortaleza, 2001. Anais...Fortaleza:ABID, 2001.

RIBEIRO, J. L. A cultura do girassol na região Meio-Norte do Brasil. Teresina: Embrapa Meio Norte, 1998. 24p. (Embrapa Meio Norte. Circular Técnica, 27).

SECRETARIA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO. Departamento Nacional de Meteorologia (Brasília, DF). Normais climatológicas (1961 – 1990). Brasília, 1992. 84p.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de; GUERRA, A. F.; FIGUERÊDO, S. F.; ANDRADE, L. M. de; ANTONINI, J. C.dos A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. Manejo de irrigação para grandes culturas. Anais... Lavras: UFLA/SBEA, 1998. cap. 3, p. 239-280.

Circular
Técnica, 73

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Algodão
Rua Osvaldo Cruz, 1143 Centenário, CP 174
58107-720 Campina Grande, PB
Fone: OXX 83 315 4300 Fax (OXX) 83 315 4367
e-mail algodão@cnpa.embrapa.br

1ª Edição
Tiragem: 500



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



Comitê de
Publicações

Presidente: Luiz Paulo de Carvalho
Secretária Executiva: Nivia M. S. Gomes
Membros: Demóstenes M. P. de Azevedo
José Wellington dos Santos
Lúcia Helena A. Araújo
Márcia Barreto de Medeiros
Maria Auxiliadora Lemos Barros
Maria José da Silva e Luz
Napoleão Esberard de M. Beltrão
Rosa Maria Mendes Freire

Expedientes: Supervisor Editorial: Nivia M. S. Gomes
Revisão de Texto: Nisia Luciano Leão
Tratamento das ilustrações: Geraldo F. de S. Filho
Editoração Eletrônica: Geraldo F. de S. Filho