

**GRAUS-DIA, TEMPERATURA BASE E
COEFICIENTES DE CULTURA PARA
CAFEEIROS ARÁBICA EM FASE DE
IMPLANTAÇÃO**

EDSON PEREIRA LIMA

2006

EDSON PEREIRA LIMA

**GRAUS-DIA, TEMPERATURA BASE E COEFICIENTES DE CULTURA
PARA CAFEEIROS ARÁBICA EM FASE DE IMPLANTAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração em Irrigação e Drenagem, para a
obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Lima, Edson Pereira

Graus-dia, temperatura base e coeficientes de cultura para cafeeiros arábica
em fase de implantação / Edson Pereira Lima -- Lavras : UFLA, 2006.

116 p. : il.

Orientador: Elio Lemos da Silva

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Café. 2. Temperatura. 3. Meteorologia. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

CDD-633.73

EDSON PEREIRA LIMA

**GRAUS-DIA, TEMPERATURA BASE E COEFICIENTES DE CULTURA
PARA CAFEIROS ARÁBICA EM FASE DE IMPLANTAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração em Irrigação e Drenagem, para a
obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA EM 22 de fevereiro de 2006

Prof. Dr. Alberto Colombo	UFLA
Profa. Dra. Ângela Maria Soares	UFLA
Prof. Dr. Antônio Augusto Aguiar Dantas	UFLA
Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa	EMBRAPA

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

OFEREÇO.

A meus pais José e Rute, que sempre me apoiaram e proporcionaram a formação superior; a minha irmã, Ediceia, pelo convívio; minha esposa, Adriana e meus filhos, Camila e Pedro, pelo incentivo e paciência,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Élio Lemos da Silva, pela orientação, ensinamentos e amizade durante o curso.

Ao professor Dr. Alberto Colombo, pela valiosa contribuição com as planilhas do Excel.

Ao amigo e professor Dr. Luís Artur Alvarenga Vilela (in memoriam), pelas conversas sempre produtivas.

Aos professores do Departamento de Engenharia, responsáveis pela minha formação.

Ao amigo Marcio Ronaldo Coelho, pela amizade, consideração e cooperação mútua para que esta tese pudesse ser realizada.

Aos colegas de pós-graduação, pelo convívio durante o curso, em especial ao amigo Gilberto Coelho.

Aos funcionários da Hidráulica, seu Berg e Neném, pela cooperação e participação desde o início deste trabalho, e ao José Luiz, pelo suporte nas análises de laboratório.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que, direta e indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, sinceramente agradeço.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 A cultura do café	3
2.2 Balanço hídrico do solo	5
2.3 Necessidades hídricas do cafeeiro	6
2.3.1 Evapotranspiração (ET)	8
2.3.2 Evapotranspiração de referência (ET _o)	9
2.3.2.1 Dados de entrada	12
2.3.2.2 Parâmetros e variáveis	12
2.3.3 Evapotranspiração real (ET _r)	20
2.3.4 Evapotranspiração da cultura (ET _c)	21
2.4 Coeficiente de cultura (K _c)	21
2.5 Temperatura base	23
2.6 Graus-dia de desenvolvimento (GDD)	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Caracterização da área experimental	29
3.2 Clima	29
3.3 Caracterização física e química do solo	29
3.4 Delineamento experimental	31
3.5 Manejo da irrigação	33
3.5.1 Curvas características	33
3.5.2 Condução	35

3.6 Determinação de graus-dia de desenvolvimento (GDD)	41
3.6.1 Método do menor desvio padrão, em dias	41
3.6.2 Método apresentado por Ometto (1981)	41
3.6.3 Método apresentado por Snyder (1985)	46
3.6.4 Método apresentado por Dufault (1997)	48
3.7 Métodos de determinação da temperatura base	49
3.7.1 Método do menor desvio padrão, em graus-dia (SDgd)	49
3.7.2 Método do menor desvio padrão, em dias (SDd)	51
3.7.3 Método do coeficiente de variação, em graus-dia (CVgd).....	52
3.7.4 Método do coeficiente de regressão (Re)	53
3.7.5 Método apresentado por Ometto (1981)	54
3.7.5.1 Temperatura base inferior (Tb)	54
3.7.5.2 Temperatura base superior (TB)	55
3.8 Balanço hídrico	55
3.8.1 Precipitação (P)	57
3.8.2 Irrigação (I)	57
3.8.3 Deflúvio superficial (S)	58
3.8.4 Drenagem interna ou ascensão capilar (D)	58
3.8.4.1 Condutividade hidráulica [K(θ)]	59
3.8.5 Evapotranspiração (ET)	62
3.8.6 Variação de armazenamento (ΔA)	62
3.8.6.1 Calibração do Profile Probe	64
3.9 Coeficiente de cultura (Kc)	67
3.10 Coeficiente de cultura (Kc) versus graus-dia de desenvolvimento (GDD)	67
3.11 Variáveis do crescimento vegetativo	68

3.12 Análise dos dados	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 Temperatura base	70
4.2 Graus-dia	77
4.3 Manejo da irrigação	79
4.3.1 Calibração do Profile Probe	81
4.3.2 Uniformidade de aplicação de água	83
4.4 Evapotranspiração do cultivo de referência (ET _o)	84
4.5 Evapotranspiração da cultura (ET _c)	89
4.6 Coeficiente de cultura (K _c)	93
4.7 Coeficiente de cultura, em função de graus-dia	95
4.8 Crescimento vegetativo	103
5 CONCLUSÕES	108
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

RESUMO

LIMA, Edson Pereira. **Graus-dia, temperatura base e coeficientes de cultura para cafeeiros arábica em fase de implantação.** Lavras: UFLA, 2006. 116p. (Tese – Doutorado em Engenharia Agrícola)*

Este trabalho teve como propósito determinar a temperatura base inferior e superior, para duas cultivares de café arábica, Acaia Cerrado (MG-1474) e Rubi (MG-1192), assim como os coeficientes de cultura, Kc, de forma a permitir o acompanhamento do ciclo fisiológico, pelo método de graus-dia de desenvolvimento (GDD), associado à exigência de água. O experimento conduzido na Universidade Federal de Lavras (UFLA) no período de março de 2003 a setembro de 2004, foi montado em um esquema de linhas e colunas, constituindo-se de 20 parcelas, sendo 10 parcelas com Acaia Cerrado e as outras 10 com Rubi. Dessas parcelas, somente 5, de cada cultivar, foram consideradas para análise, uma vez que somente estas haviam atingido a primeira florada até o final do período de coleta de dados. Cada parcela era constituída de 9 plantas em espaçamento de 3,5 x 0,80 m, identificada pela sua data de transplante e cultivar correspondente. Usou-se para análise estatística um estudo com regressão e para comparações entre as regressões, foi utilizado o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989). Os valores de Graus-Dia de Desenvolvimento, GDD, foram obtidos com a metodologia apresentada por Ometto (1981), comparada com os métodos apresentados por Arnold (1959), Snyder (1985) e Dufault (1997). Obteve-se as temperaturas, base inferior de 12,9°C e base superior de 32,4°C, após comparações entre os métodos: menor desvio padrão em graus-dia e dias, coeficiente de variação em graus-dia e coeficiente de regressão. Os valores de coeficientes de cultura, Kc, para ambas cultivares até 4200 GDD foram 0,20, 0,89 e 0,48, Kc mínimo, máximo e médio respectivamente. Para o crescimento vegetativo de ambas cultivares, diâmetro de copa e caule e comprimento do ramo plagiotrópico tiveram um bom ajuste em função de GDD. Cada variável avaliada, menos altura de planta, pode ser representada por uma única equação polinomial de 3º grau com dados agrupados de ambas cultivares. A altura de planta até 2500 GDD para ambas cultivares teve um desenvolvimento crescente e paralelo; deste ponto em diante, a cultivar Rubi apresentou uma redução na taxa de crescimento. A variável crescimento em comparação às demais, do crescimento vegetativo, foi representada de forma diferente, individualmente por duas equações polinomiais de 3º grau. Porém todas as variáveis ajustadas em função de graus-dia apresentaram boa performance.

* Orientador: Elio Lemos da Silva - UFLA

ABSTRACT

LIMA, Edson Pereira. **Degree-day, base temperature and crop coefficients for arabic coffee plants in implantation phase**. Lavras: UFLA, 2006. 116p. (Dissertation - Agricultural Engineering)*

This work had as purpose the determination of the inferior and superior base temperature as well crop coefficients, Kc for two cultivars of Arabic coffee, Acaiá Cerrado(MG-1474) and Ruby (MG-1192), in way to allow the representation of the growing degree-day (GDD) based crop coefficients. The experiment was carried out in the “Federal University of Lavras” (UFLA) in the period of March 2003 to September 2004, in an outline of lines and columns, constituted of 20 plots 10 with Acaiá Cerrado and 10 with Ruby. Each plot was constituted of 9 plants in spacing of 3.5 x 0.80 m, identified by its transplanting date. It was used for statistical analysis a study with regression. and for the comparisons among the regressions, was used the procedure described in Snedecor & Cochran (1989). The values of GDD, were obtained with the methodology presented by Ometto (1981), compared with the methods presented by Arnold (1959), Snyder (1985) and Dufault (1997). The temperatures, 12,9°C for the inferior base and 32,4°C for the superior base, after comparisons among the methods: least standard deviation in degree-day and days, coefficient of variation in degree-day and regression coefficient. The values of crop coefficients, Kc, for both cultivars up to 4200 GDD were 0.20, 0.89 and 0.48, as minimum, maximum and medium Kc respectively. The vegetative growth of both cultivars, the canopy and stem diameter, and length of the lateral branch had a good adjustment with GDD. Each variable but plant height, can be represented by a single 3^o degree polynomial equation for both cultivars. The plant height, up to 2500 GDD for both cultivars, had a increasing and parallel development; from that point on the cultivar Ruby presented a reduction in the growth rate. The variable growth, in comparison to the others, was represented by a different way, individually, for two 3^o degree polynomials equations of. All the adjusted variables as a function of GDD presented good performace.

* Adviser: Elio Lemos da Silva - UFLA

1 INTRODUÇÃO

Grande parte do sucesso de uma agricultura irrigada depende de um adequado manejo dos recursos naturais solo-água que, interagindo com a atmosfera, determinam as condições potenciais de máxima produtividade de uma cultura que esteja com plenas condições de sanidade e nutrição. Dessa forma, a agricultura irrigada necessita de um manejo adequado do sistema de irrigação, que seja capaz de proporcionar a utilização racional e mais eficiente dos recursos hídricos, sem agredir o meio ambiente.

A irrigação é influenciada pelos fatores ambientais, principalmente pelas características físicas dos solos, pelos tipos de cultura e pelo clima, tornando-se uma das principais ferramentas para a agricultura moderna. Logo, torna-se necessário o estudo de variáveis que auxiliem na tomada de decisão agrícola. Uma dessas variáveis, o coeficiente de cultura (K_c), quando associado a alguns fatores ambientais, permitirá determinar o controle da irrigação.

As informações existentes de coeficiente de cultura, K_c , caracterizam as fases da cultura em dias após o início da emissão de novas folhas ou dias após o plantio, seguindo, na maioria das vezes, o calendário Juliano. No entanto, a duração das fases fenológicas de uma cultura, avaliada pelo número de dias do calendário, varia bastante entre regiões, anos e datas de plantio, em razão das freqüentes mudanças das condições do tempo e das diferenças climáticas. A determinação de lâmina de irrigação utilizando coeficientes de cultura, K_c , obtidos em locais diferentes da lavoura implantada, pode ser equivocada se as condições dos locais, onde K_c foi obtido e onde a cultura está implantada, forem diferentes, podendo-se superestimar ou subestimar o consumo de água pela lavoura. A utilização apropriada de variáveis meteorológicas, que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas, permite determinar com maior precisão a duração das fases fenológicas das plantas cultivadas. Uma forma

alternativa de caracterizar cada uma dessas fases é a utilização dos graus-dia, que nada mais é que o acúmulo diário da energia. Para definir esta nova forma de acompanhamento das fases da cultura e relacioná-la a momento e lâmina de irrigação é necessário, primeiro, a definição da temperatura mínima exigida pelo cafeeiro, para o seu normal consumo de água e desenvolvimento (temperatura base inferior), bem como os valores de K_c durante as suas diferentes fases fenológicas. Esta temperatura base representa a menor temperatura abaixo da qual o desenvolvimento da planta é nulo; abaixo desta temperatura a planta não se desenvolve e, se o fizer, será a uma taxa muito reduzida.

Com uma curva de K_c como função de graus-dia de desenvolvimento para o cafeeiro, mais dados de evapotranspiração de referência, E_{To} , e um termômetro de máximas e mínimas, espera-se que o irrigante ou pesquisador possa determinar com mais precisão o momento certo de irrigar e a lâmina mais adequada de irrigação.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo determinar as temperaturas mínima e máxima, temperatura base inferior e superior, e coeficientes de cultura, K_c , de cafeeiros arábica (*Coffea arabica*) em fase de implantação, de forma a permitir acompanhar o seu desenvolvimento, pelo método de graus-dia de desenvolvimento (GDD), associado à exigência de água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do café

O café (*Coffea*) é o principal gênero da família das Rubiáceas, que possui mais de 6.000 espécies. Deste gênero, duas espécies têm grande importância econômica: *Coffea arabica* (aproximadamente 70% da produção mundial) e *Coffea canephora* (aproximadamente 30% da produção mundial) (Agrianual, 2004).

O café da espécie arábica (*Coffea arabica* L.) é originário de áreas florestais elevadas da Etiópia, próximas à linha equatorial, em latitudes variáveis de 6° a 9° N, altitudes médias de 1.500 a 1.900 metros, onde a temperatura média anual do ar oscila entre 17°C e 20°C e chuvas de 1.500 a 2.000 mm anuais. As temperaturas médias anuais entre 18°C e 22°C são as indicadas como os limites para o desenvolvimento de *Coffea arabica* L. Já o café robusta (*Coffea canephora*) é oriundo de regiões equatoriais baixas, quentes e úmidas da bacia do Congo e está adaptado às condições de temperaturas mais elevadas, com médias anuais entre 22°C e 26°C (Clarke & Macrae, 1985; Matiello, 1991; Pedini, 2000).

Embora o cafeeiro possa vegetar em uma extensa área geográfica, entre os trópicos, a sua produção econômica se restringe a uma área bem menor, na qual os fatores ecológicos são mais favoráveis.

O cafeeiro arábica, em áreas com temperaturas médias anuais elevadas (acima de 23°C), apresenta a frutificação e a maturação demasiadamente precoces, o que pode acarretar perdas na qualidade final do produto, pois as fases da colheita e secagem podem coincidir com períodos quentes e chuvosos. Por outro lado, temperaturas médias anuais baixas (inferiores a 18°C) provocam

aumento no período de frutificação, podendo ocorrer a maturação, sobrepondo-se ao florescimento no ano seguinte, prejudicando a vegetação e a produção final (Alfonsi, 2000).

O cafeeiro é pouco tolerante ao frio, portanto, as condições de relevo são fundamentais para a localização das lavouras. No Brasil, próximo às áreas limítrofes tropicais, podem ser identificadas regiões com frequências elevadas de ocorrência de geadas. Na faixa territorial entre os paralelos 18° e 22° de Minas Gerais, nordeste, norte e oeste de São Paulo, as ocorrências do fenômeno são esporádicas, de baixa frequência. No entanto, abaixo da latitude 22°S, a frequência das geadas aumenta, principalmente nas regiões cafeeicultoras do sudoeste do estado de São Paulo e do Paraná (Alfonsi, 2000).

Toda a cafeicultura comercial do Brasil, ainda segundo Alfonsi (2000), apresenta o florescimento na primavera, a frutificação no verão, a maturação no outono e a colheita no inverno. Nas principais áreas cafeeiras do centro-sul do Brasil, em latitudes superiores a 20°S, o clima, chuvoso na primavera/verão, seguido de uma estação relativamente seca no outono/inverno, favorece bastante a frutificação e a produção do cafeeiro. As fases críticas, como a formação do "chumbinho" e a granação, são beneficiadas pelas chuvas da primavera e verão e as da maturação e colheita pelo outono e inverno relativamente secos.

De acordo com Barros et al. (1995), é restrito o conhecimento da demanda hídrica pelo cafeeiro, a qual é influenciada por fatores como localidade, cultivar, espaçamento, sistema de poda e densidade de plantio. Para Carr (2001), sabe-se pouco sobre o consumo hídrico das culturas e os métodos atuais de estudo desse parâmetro, para fins de irrigação, os quais são imprecisos e sujeitos a erros.

2.2 Balanço hídrico do solo

O consumo de água pelas comunidades vegetais é uma variável importante a ser considerada nos estudos de regionalização agrícola ou na avaliação da produtividade das culturas. Uma forma pela qual esse consumo hídrico (evapotranspiração) pode ser determinado é pelo balanço hídrico no solo.

Atualmente, a ênfase destes balanços tem sido dada à disponibilidade de água no solo, relacionada com elementos climáticos e desenvolvimento vegetal. A disponibilidade de água no solo não se baseia apenas em dados de precipitação pluvial, sendo também necessário levar-se em conta as perdas de água no solo para a atmosfera, que ocorrem, normalmente, pela perda de água por evaporação mais transpiração vegetal (Andreatta, 1990). A determinação desses componentes pode ser feita por diferentes técnicas.

O balanço hídrico é a contabilidade de todas as adições, retiradas e armazenamento de água no solo, representando a aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo. A variação do armazenamento representa o balanço entre as entradas e as saídas de água do volume de controle em um determinado intervalo de tempo (Pereira et al., 1997; Reichardt, 1990). A entrada de água se dá sob a forma de irrigação, precipitação e ascensão capilar, e a saída, sob a forma de evapotranspiração e drenagem profunda. A parcela da precipitação a ser contabilizada deve levar em conta um eventual escoamento superficial. O volume de controle é limitado, em seu contorno superior, pela superfície do solo e pela cobertura vegetal, e o contorno inferior situa-se na profundidade estabelecida para o sistema radicular da cultura.

O método do balanço de água num volume de controle de solo tem sido apresentado por vários autores (Cintra et al., 2000; Guandique & Libardi, 1997), sendo seus componentes (precipitação, irrigação, evapotranspiração, deflúvio

superficial, drenagem, ascensão capilar e variação da armazenagem de água no solo) apresentados numa forma integrada ou diferenciada numa equação geral de balanço de massa.

A precipitação é medida com considerável precisão por pluviômetros ou pluviógrafos. O principal problema consiste na representatividade de dados coletados numa estação meteorológica. Sua distância até a cultura onde se realiza o balanço é de fundamental importância, sendo recomendável que a medida da chuva seja feita o mais próximo possível da área experimental.

Os fluxos de água no solo na profundidade considerada (L) e a variação de armazenamento de água numa camada de profundidade 0 - L são fatores tipicamente de solo. Variam de classe de solo para classe de solo e dependem da heterogeneidade do perfil e de todos os outros componentes do balanço. O armazenamento de água no solo pode ser realizado pelo método gravimétrico direto ou equipamentos como o tensiômetro e sonda de nêutrons, no entanto, este item está sujeito a erros de determinação quando obtido com intervalos longos e em períodos chuvosos.

2.3 Necessidades hídricas do cafeeiro

O cafeeiro arábica é extensamente cultivado em regiões tropicais, sendo cultura de grande importância econômica para o Brasil. Atualmente, ele é cultivado nas regiões de cerrado de Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Mato Grosso do Sul, onde as características edafoclimáticas são excelentes à exploração de cafeeiros de alta qualidade. Porém, essas regiões apresentam deficiência hídrica no período crítico da cultura, florescimento e frutificação, para as quais a irrigação suplementar é necessária para aumentar a produtividade e a qualidade da bebida. Dessa forma, a cafeicultura passa a ser cada vez mais dependente da suplementação hídrica e, para que a aplicação de água seja

eficiente, é fundamental o conhecimento adequado da demanda hídrica da cultura, que, por sua vez, é regulada por suas características biológicas e pelo clima da região.

Mesmo as regiões climaticamente aptas ao cultivo do cafeeiro estão sujeitas ao efeito de estiagens (veranicos) que podem comprometer a produção. No entanto, o aumento da eficiência da prática irrigacionista exige, em primeiro lugar, informações sobre o consumo hídrico do cafezal, que são escassas.

Estudos hídricos nas fases fenológicas do cafeeiro feitos por Camargo et al. (1984, 1986) indicam que, se ocorrer déficit hídrico na fase de expansão e floração (chumbinho), haverá atraso no crescimento dos frutos, resultando em peneira baixa e reduzindo a produtividade. Ocorrendo déficit hídrico na fase de granação dos frutos (janeiro a março), há indução a um maior percentual de grãos chochos. Na fase de maturação e abotoamento (abril a junho), o déficit hídrico não afeta a maturação dos frutos já formados e nem a produtividade do ano, no entanto, prejudica a abotoação e frutificação da safra seguinte. Segundo esses autores, o déficit hídrico pode ser até benéfico na fase de dormência (julho a setembro), uma vez que pode condicionar um florescimento abundante após as chuvas ou irrigação, no final da fase, promovendo frutificação e maturação igualadas na safra seguinte.

Algumas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de estimar a demanda hídrica da cultura do cafeeiro em situações diversas. No entanto, estudos dessa natureza são complicados pelas peculiaridades micrometeorológicas introduzidas pela configuração geométrica de plantio, principalmente quanto à interceptação da radiação, ao regime de ventos e ao aproveitamento da água do solo. Adicionalmente, um aspecto que deve ser mencionado em estudos neste tipo de cobertura é a partição da evapotranspiração em seus componentes, a transpiração e a evapotranspiração da

entrelinha, como base para um manejo mais adequado da irrigação (Marin, 2003).

A transferência de água por evaporação e transpiração é de grande importância na determinação das necessidades hídricas das culturas, pois esta quantidade precisa ser repostada sob forma de irrigação para que as culturas não sofram déficit hídrico com conseqüente influência na produtividade (Guandique, 1993). Antunes et al. (2000) realizaram, em Viçosa, MG, estudos em duas cultivares de cafeeiro arábica em formação, irrigadas por gotejamento, por meio de dois métodos, lisimetria e balanço hídrico, encontrando uma evapotranspiração média da cultura no período mais quente de $1,45 \text{ mm d}^{-1}$ e no mais frio de $1,05 \text{ mm d}^{-1}$ com coeficientes de cultura de 0,35 e 0,40 para os mesmos períodos, respectivamente.

Sousa et al. (2001) avaliaram cafeeiros em produção, irrigados por pivô central, no Norte do Espírito Santo e no Sul da Bahia e encontraram uma demanda hídrica com valores médios de 2,4 a $2,7 \text{ mm d}^{-1}$, e um coeficiente de cultura, K_c , de 0,8, utilizando o método do balanço hídrico. Utilizando também o método do balanço hídrico, para duas cultivares de café arábica na fase de maturação de frutos, Neto et al. (2001) encontraram uma evapotranspiração de $2,17 \text{ mm d}^{-1}$, para o período de janeiro a junho de 2001, e valores de K_c variando de 0,49 a 0,60, em Viçosa, MG.

2.3.1 Evapotranspiração (ET)

A água é o elemento essencial ao metabolismo vegetal, pois participa, principalmente, da constituição celular e do processo de fotossíntese. A planta, todavia, transfere para a atmosfera cerca de 98% da água retirada do solo. Por isso, o consumo de água das plantas normalmente se refere à água perdida pela evaporação (E) da superfície do solo e pela transpiração (T). Esses processos,

embora independentes, ocorrem simultaneamente, dando origem ao termo evapotranspiração (ET) (Pereira et al., 1997).

2.3.2 Evapotranspiração de referência (ET_o)

A definição do termo evapotranspiração de referência (ET_o) surgiu no início dos anos 1970, visto que as definições originais, embora definidas corretamente, não especificavam o tipo de vegetação, o grau e a altura da cobertura vegetal do solo, as dimensões da superfície e as condições de bordadura. Como é o caso das sugestões feitas por Wright & Jensen (1972), segundo os quais a cultura de referência deveria ser a alfafa, em fase de crescimento ativo, com tamanho variando entre 0,3 e 0,5m de altura e bordadura mínima de 100m. Posteriormente, Doorenbos & Pruitt (1977) definiram como ET_o a evapotranspiração que ocorre em uma extensa área de grama com altura de 0,08 a 0,15m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Este conceito passou a ser conhecido mundialmente em apresentação do “Guidelines for Predicting Crop Water Requirements”, Boletim FAO-24, publicado por Doorenbos & Prutti (1977), e teve como objetivo evitar conflitos entre definições existentes para evapotranspiração potencial (ET_p).

Desta forma, de acordo principalmente com as definições de Doorenbos & Pruitt (1977), a partir dos anos 1980, a terminologia evapotranspiração de referência (ET_o) é preferida à evapotranspiração potencial (ET_p) (Andrade et al, 1998).

A evapotranspiração de referência, segundo Burman et al. (1980), pode ser determinada a partir de lisímetros, balanço hídrico, fórmulas empíricas, semi-empíricas e evaporímetros. A lisimetria é considerada como o único método para a determinação da evapotranspiração com o nível de precisão adequado, sendo utilizado na calibração de outros métodos de estimativas.

Entretanto, por ser extremamente difícil e onerosa, exigindo a instalação de equipamentos especiais, a sua utilização é limitada.

Em maio de 1990, a *Food and Agriculture Organization* (FAO), da Organização das Nações Unidas (ONU), organizou uma consulta a um grupo de especialistas para rever o seu boletim FAO-24, “Guidelines for Predicting Crop Water Requirements” (Doorenbos & Pruitt, 1977), a fim de avaliar novos procedimentos para estimativa da ETo. Este boletim sugeria a estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) a partir da evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultura (Kc), utilizando-se como padrão o método de Penman (1948). O painel de especialistas recomendou unanimemente a adoção do modelo de Penman-Monteith como novo padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), mesmo para locais com deficiência de dados meteorológicos necessários ao seu uso, fornecendo procedimentos e parametrizações adequadas a diversas escalas de tempo (diária, decenal, e mensal). Essa nova equação, de formulação teórica rigorosamente física que possibilita o entendimento dos processos físicos e biológicos envolvidos na evaporação da água de superfícies vegetadas, passou a ser adotada como padrão pela FAO a partir de 1991 (Smith, 1991).

O modelo de Penman-Monteith, desenvolvido por Monteith (1965), é um método combinado, desenvolvido a partir da introdução da relação entre a resistência ao fluxo de vapor pela folha (r_c) e a resistência aerodinâmica (r_a) no modelo original de Penman, na tentativa de descrever o papel da turbulência atmosférica no processo de transporte do vapor d'água e as características fisiológicas da planta. A teoria da grande folha (“big leaf”) adotada pelo pesquisador, assume que todas as folhas estão expostas às mesmas condições ambientais, embora, segundo Pereira et al. (1997), essa não seja a condição real.

Posteriormente, Allen et al. (1998) redefiniram ETo como sendo aquela de uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23, e

resistência da superfície ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m^{-1} . Uma cultura nessas condições possui índice de área foliar (IAF) ao redor de 3 m^2 de área foliar por m^2 de terreno ocupado e assemelha-se a uma superfície verde sombreando totalmente o solo, bem suprida de umidade e em crescimento ativo.

A incorporação dos efeitos da área foliar e da altura da vegetação no modelo de Penman-Monteith faz com que este modelo estime com maior precisão a evapotranspiração de referência para uma ampla variedade de climas e localidades (Peres, 1994). Diversas pesquisas, realizadas em várias regiões, comprovaram a superioridade do modelo de Penman-Monteith.

No estado de São Paulo, o modelo de Penman-Monteith foi estudado por Peres (1994) na estimativa da ETo em três localidades, originando resultados consistentes e bem correlacionados com os valores medidos em evapotranspirômetros, indicando que pode ser utilizado com sucesso na determinação das necessidades hídricas das culturas. Em Piracicaba, SP, Sentelhas (1998) também verificou que o método de Penman-Monteith apresentou estimativas melhores da ETo, quando comparado com o método de Penman e Priestley-Taylor, utilizando o lisímetro de pesagem como referência.

O cálculo da evapotranspiração de referência, conforme Penman-Monteith – FAO/56, Equação 1 e os algoritmos apresentados por Allen et al. (1998), com dados de entrada, parâmetros e variáveis necessárias para a determinação da evapotranspiração de referência são apresentados na seqüência.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

em que:

ETo: evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

Rn: saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G: densidade de fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

T: temperatura média diária ($^\circ\text{C}$);

u_2 : velocidade média do vento medida a 2m (m s^{-1});

$(e_s - e_a)$: déficit de pressão de vapor do ar para altura de referência medida (kPa);

Δ : declividade da curva de pressão de vapor contra temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

2.3.2.1 Dados de entrada

Temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$, $^\circ\text{C}$);

Temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$, $^\circ\text{C}$);

Radiação solar global (R_s , $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

Velocidade média do vento (u_2 , m s^{-1});

Umidade relativa média do ar (UR_{med} , %).

Outros: altitude, latitude, dia Juliano, pressão atmosférica.

2.3.2.2 Parâmetros e variáveis

a) 0,408 é o inverso do calor latente de evaporação a 20°C (kg MJ^{-1}).

b) 900 é o coeficiente para a cultura de referência ($\text{kJ}^{-1} \text{kg K}^\circ \text{d}^{-1}$), que envolve os valores constantes da equação

c) Fluxo de calor do solo

$$G = c_s \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta T} \right) \Delta Z \quad (2)$$

em que:

G: fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

c_s : capacidade calorífica do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

T_i : temperatura do ar no dia i ($^{\circ}\text{C}$);

T_{i-1} : temperatura do ar no dia $i-1$ ($^{\circ}\text{C}$);

ΔT : intervalo de tempo (dia);

ΔZ : profundidade efetiva do solo (m).

O boletim da FAO 56 (Allen et al., 1998) recomenda que, para períodos diários, G pode ser desprezível.

d) Quadrado da distância relativa sol-Terra

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (3)$$

em que:

d_r : quadrado da distância relativa sol-Terra em (radianos);

J: dia Juliano.

A seguir são apresentadas as Equações 4 e 5, para os cálculos de declinação solar (δ) e ângulo horário ao pôr do sol (ω_s):

e) Declinação solar (δ)

$$\delta = 0,049 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (\text{radianos}) \quad (4)$$

f) ângulo horário ao por do sol (ω_s)

$$\omega_s = ar \cos [-tg(\varphi)tg(\delta)] \quad (5)$$

em que:

φ : latitude local em radiano;

δ : declinação solar, em radiano;

ω_s : ângulo horário ao pôr do sol, em radianos.

g) Radiação solar no topo da atmosfera

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (6)$$

em que:

Ra: radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G_{sc} : constante solar ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

h) Velocidade média do vento a 2m

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad (7)$$

em que:

u_2 : velocidade média do vento a 2m de altura (m s^{-1});

u_z : velocidade do vento a 'z' m da superfície (m s^{-1});

z: altura de medição da velocidade do vento acima da superfície (m).

i) Pressão de saturação de vapor

A pressão de saturação vapor é calculada de acordo com o Boletim da FAO 56 (Allen et al., 1998), pela Equação 8.

$$e_s = \left[\frac{e^{\circ}(T \text{ max}) + e^{\circ}(T \text{ min})}{2} \right] \quad (8)$$

em que:

$e^{\circ}(T_{\text{máx}})$: pressão de saturação de vapor à temperatura máxima (kPa);

$e^{\circ}(T_{\text{mín}})$: pressão de saturação de vapor à temperatura mínima (kPa).

As equações de $e^{\circ}(T_{\text{máx}})$ e $e^{\circ}(T_{\text{mín}})$ são expressas pelas Equações 9 e 10.

$$e^{\circ}(T \text{ max}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T \text{ max}}{T \text{ max} + 237,3} \right] \quad (9)$$

$$e^{\circ}(T \text{ min}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T \text{ min}}{T \text{ min} + 237,3} \right] \quad (10)$$

j) A pressão parcial de vapor

A pressão parcial de vapor (e_a), de acordo com o Boletim da FAO 56, Allen et al. (1998), deve ser calculada a partir da $UR_{\text{máx}}$ e $UR_{\text{mín}}$, caso os dados estejam disponíveis, durante períodos de uma semana, dez dias ou um

mês. URmax e URmin são obtidas dividindo-se a soma dos valores diários pelo número de dias daquele período.

Pode ser obtida também a partir URmax, quando os equipamentos usados para obter a URmin gerar grandes erros ou quando a integridade dos dados de UR for duvidosa.

Na ausência de URmax e URmin, a Equação 11 que pode ser usada para calcular e_a .

$$e_a = \frac{UR_{med}}{100} e_s \quad (11)$$

k) Declividade da curva de pressão de saturação de vapor

A declividade da curva de pressão de saturação de vapor pode ser obtida a partir da Equação 12.

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (12)$$

em que:

Δ : declividade da curva de pressão de saturação de vapor (kPa °C⁻¹);

T: temperatura média do ar (°C), dada pela Equação 13.

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (13)$$

L) Radiação solar incidente

Se a radiação solar incidente, R_s , não for medida, poderá ser calculada com a fórmula de Angström, que relaciona radiação solar à radiação extraterrestre e duração de horas solar (Equação 14).

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (14)$$

Com os parâmetros, ' a_s ' igual a 0,25 e ' b_s ' igual a 0,50 determinados para Lavras, MG, e com o valor de ' N ' calculado por meio da Equação 15.

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (15)$$

em que:

N : número de horas de brilho solar (hora);

ω_s : ângulo horário ao pôr do sol, em radianos (Equação 5).

m) Saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns})

O saldo de radiação de ondas curtas é dado pela Equação 16.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (16)$$

em que:

R_{ns} : saldo de radiação de ondas curtas em ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

α : albedo ou coeficiente de reflexão, valor recomendado para a cultura padrão é de 0,23;

R_s : radiação solar incidente, neste trabalho é um parâmetro medido ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

n) Radiação solar em dias de céu claro (R_{so})

Quando se dispõe dos coeficientes ' a_s ' e ' b_s ' abaixo, usa-se a Equação 17.

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (17)$$

em que:

a_s e b_s : fração da radiação extraterrestre em dias claros ($n = N$).

Quando não se dispõe dos coeficientes ' a_s ' e ' b_s ' acima, usa-se a Equação 18.

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \cdot z)R_a \quad (18)$$

em que:

R_{so} : radiação solar em dias de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

z : altitude local (m)

R_a : radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dada pela Equação 6.

o) Saldo de radiação de ondas longas (R_{nl})

O saldo de radiação de ondas longas é dado pela Equação 19.

$$Rnl = \sigma \left[\frac{T_{\max, k^4} + T_{\min, k^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (19)$$

em que

σ : constante de Stefan-Boltzman igual a $4,903 \times 10^{-9}$ (MJ K⁻⁴ m⁻² d⁻¹);

e_a : pressão parcial de vapor (kPa);

R_{so} : radiação solar em dias de céu claro (MJ m⁻² d⁻¹).

p) Saldo de radiação (Rn)

$$Rn = Rns - Rnl \quad (20)$$

em que:

Rns: saldo de radiação de ondas curta;

Rnl: saldo de radiação de ondas longas.

q) Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} \quad (21)$$

em que:

γ : constante psicrométrica, de acordo com Brunt (1952) citado por (Smith, 1991) em (kPa °C⁻¹);

λ : calor latente de evaporação da água (2,45 MJ kg⁻¹ a 20°C);

c_p : calor específico a pressão constante ($1,013 \times 10^{-3}$ MJ kg⁻¹ °C⁻¹);

ϵ : relação entre peso molecular do vapor da água e do ar seco (0,622).

P: pressão atmosférica (kPa).

O valor da pressão atmosférica foi obtido conforme Burman (1987), citado por Smith (1991), por meio da Equação 22.

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (22)$$

em que:

z: altitude local (m).

r) Déficit de pressão de vapor (DPV)

$$DPV = e_s - e_a \quad (23)$$

2.3.3 Evapotranspiração real (ETr)

Segundo Pereira et al. (1997), a evapotranspiração real é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo. Assim, ETr é aquela que ocorre em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno. Segundo Jacomazzi (2004), é aquela que ocorre em condições reais sendo estimada, principalmente, por meio do balanço hídrico climatológico, o qual considera o efeito da disponibilidade de água no solo na determinação da evapotranspiração real.

2.3.4 Evapotranspiração da cultura (ETc)

Para uma cultura em pleno desenvolvimento vegetativo, evidentemente, ocorre a evapotranspiração real, que, sem restrição de água no solo, na prática, é denominada evapotranspiração da cultura (ETc).

O conhecimento de ETc representa a quantidade de água a ser adicionada ao solo, para manter o crescimento e a produção em condições ideais e pode ser estimada em condições de campo por meio de lisímetros e do método do balanço hídrico. Por sua vez, os lisímetros, também chamados de evapotranspirômetros, podem determinar tanto a evapotranspiração de referência quanto a evapotranspiração da cultura.

Para isso, quando se objetiva conhecer ETo, planta-se a grama batatais (*Paspalum notatum*), além de obedecer a todos os requisitos para a ocorrência da ETo. Quando se cobre o lisímetro com a cultura de interesse e as condições são aquelas que ocorrem sem imposição de nenhuma condição de contorno, determina-se a ETc e ainda pode-se usar este equipamento para determinar a evaporação de um solo nu (Aboukhaled et al., 1982).

2.4 Coeficiente de cultura (Kc)

O coeficiente de cultura vem sendo utilizado conforme metodologia recomendada pela FAO para a estimativa da evapotranspiração da cultura, ETc (Doorenbos & Pruitt, 1977). Este é um coeficiente adimensional, proposto inicialmente por Van Wilk & De Vries (1954), citados por Melo (2001), calculado pela razão entre a evapotranspiração de uma cultura e a evapotranspiração de referência, cujos valores variam com as características específicas de cada cultura, estágio de desenvolvimento, época de plantio, densidade de plantio, duração da estação de crescimento, condições de umidade

e clima (Doorenbos & Pruitt, 1977). Sedyama (1987) acrescenta que o coeficiente de cultura pode variar, também, com a textura e umidade do solo e com a profundidade e densidade radicular. Já Villa Nova (1983) enfatiza que o índice de área foliar é a principal característica que pode resultar em diferentes valores de coeficientes de cultura. Para a maioria das culturas, os valores de K_c , segundo Doorenbos & Kassan (1979), assumem valores baixos na fase da emergência, valores máximos durante o período de desenvolvimento vegetativo e declinam na fase de maturação.

Dessa forma, o coeficiente de cultura, K_c , é um indicador de grande significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, da arquitetura da planta (parte aérea e sistema radicular), da cobertura vegetal e da transpiração da planta (Allen et al., 1994; Wright, 1982). Na definição de seus valores, não se tem considerado diretamente, para efeito de cálculo, a superfície transpirante, que depende da população e distribuição de plantas, bem como do manejo da cultura em relação às plantas daninhas. Em face das diferentes condições brasileiras, a determinação de K_c para o cafeeiro requer maior experimentação agrônômica e, igualmente, maior diversidade climática (Arruda et al., 2000).

O coeficiente de cultura tem sido determinado com base em semana ou mês do ano, porém, algumas pesquisas já foram desenvolvidas com o objetivo de se determinar coeficientes de cultura, como função do estágio fenológico, percentagem do ciclo (Tosso & Torres, 1986) e graus-dia de desenvolvimento (Fox Jr. et al., 1992; Sammis et al., 1985).

Clowes (1984) considera um K_c de 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro. Gutiérrez & Meinzer (1994) sugerem para o Hawaii um coeficiente de 0,58 para cafeeiros com 1 ano de plantio e um coeficiente variando de 0,75 a 0,79 para cafeeiros de 2 a 4 anos de plantio.

Santinato et al. (1996) apresentam valores de coeficientes de cultura para cafeeiro em função do espaçamento entre ruas e plantas conforme a idade

da lavoura sendo iguais a 0,6; 0,7 e 0,8 em lavouras com até 12 meses para densidades de 2.500 plantas ha⁻¹, 3.300 plantas ha⁻¹ e 6.700 plantas ha⁻¹, respectivamente. Nessa ordem, em relação à densidade de plantas, os autores recomendam valores de Kc iguais a 0,8; 0,9 e 1,0 em lavouras entre 12 e 36 meses, e iguais a 1,0; 1,1 e 1,2 com idade superior a 36 meses. Arruda et al. (2000) obtiveram valores de coeficientes de cultura entre 0,73 e 0,75, nos primeiros anos de idade da planta e entre 0,87 e 0,93, aos sete e oito anos, respectivamente.

Para cafezais com manejo adequado e altura de 2 m a 3 m, em clima subúmido, Allen et al. (1998) propõem Kc entre 0,90 e 0,95 e entre 1,05 e 1,10, respectivamente, na ausência e na presença de plantas daninhas, com a evapotranspiração de referência estimada pela equação de Penman-Monteith (versão FAO). Derivados os valores de Kc e considerados os componentes transpiração e evaporação de solo, os autores obtiveram, respectivamente, 0,80 a 0,90 e 0,85 a 0,90, com a superfície do solo seca.

Oliveira (2003) encontrou valores de Kc variando de 0,44 a 0,87, com valor médio de 0,51 para uma cultura de café recepado e, para o cafeeiro adulto com 16 anos de idade, encontrou valores de coeficiente de cultura variando de 0,72 a 1,5, com valor médio de 0,97, em estudos conduzidos no período de junho a outubro, na região de Lavras.

2.5 Temperatura base

Independentemente de quão favorável possam ser as condições de radiação solar, a planta não se desenvolve ou se desenvolve a taxas muito reduzidas quando a temperatura cai abaixo de um valor mínimo (Fox Jr. et al., 1992) ou a planta não se desenvolve ou se desenvolve a taxas muito reduzidas quando excede um valor máximo (Volpe, 1992).

Entre estes limites, existe um ótimo de temperatura no qual o crescimento se dá com maior rapidez. Estes três valores são conhecidos como temperaturas cardeais. A complexidade fisiológica da planta impede a determinação precisa destas temperaturas. Contudo, é possível encontrar, na literatura, resultados de pesquisas com faixas de valores aproximados da espécie cultivada. Segundo Matiello (1991), as temperaturas ótimas para o crescimento do cafeeiro jovem (até o primeiro ano) são de cerca de 30°C durante o dia e 23°C à noite. À medida que a planta cresce, elas diminuem, sendo que, após um ano e meio de idade, as temperaturas ideais, diurnas e noturnas, situam-se em torno de 23°C e 17°C. A máxima fotossíntese ocorre a uma temperatura de 24°C, havendo um decréscimo de 10% no processo, com o aumento de cada grau de temperatura acima. Logo, o aumento de temperatura dentro do intervalo compreendido entre a temperatura base inferior e superior acelera o desenvolvimento da planta, reduzindo o seu ciclo. Com base nesse princípio, explicavam-se as diferentes durações do ciclo de uma cultura, em dias, para cultivos em localidade com regimes de temperaturas diferentes.

Segundo Arnold (1959), citado por Lozada Garcia (1993), a temperatura base é influenciada pela faixa de temperaturas usadas no cálculo de graus-dia. Portanto, um dos pré-requisitos para a determinação de um valor apropriado é que os dados a partir dos quais ela é estimada envolvam uma faixa de valores normalmente encontrada no subperíodo de desenvolvimento para a qual essa temperatura vai ser usada.

Arnold (1959), citado por Bolonhezi (2000), propôs o método da menor variabilidade para a determinação da temperatura base, realizando pesquisas com milho doce. Este método ainda é o mais utilizado e baseia-se em uma série de sementeiras e na atribuição, antes de instalar o ensaio, de alguns valores de temperatura base, a partir dos quais são calculados os somatórios de graus-dia, desvio padrão em graus-dia e desvio padrão em dias. Considerando-se a média

de temperatura da série de semeadura, a temperatura base determinada será aquela que coincidir com o menor desvio padrão em dias, confirmado matematicamente pelo coeficiente de variação.

No que se refere à cultura do cafeeiro, não se conhecem muitos estudos para determinar a sua temperatura basal inferior (Tb) e superior (TB). Entretanto, de acordo com Iaffe et al. (2001), a Tb estimada pelo método da menor variação no desvio padrão foi de 11°C, para a região de Campinas, SP; para esse valor, a soma média foi de 2642 graus-dia, entre a florada principal e a colheita, que durou 237 dias. Já para a região de Botucatu, SP, com altitude média de 807 m, Iaffe et al. (2001), citados por Coelho (2004), observaram a temperatura base estimada em 12,3°C, com intervalo maior de 303 dias entre o florescimento e a colheita, devido às temperaturas mais baixas quando comparadas às de Campinas, e 34°C para a temperatura base superior.

Outra metodologia de determinação da temperatura base, inferior e superior, para culturas anuais, é apresentada por Ometto (1981). Neste método, para a determinação da temperatura base inferior para uma cultura, esta deve ser plantada seqüencialmente em duas datas no mesmo período frio (inverno-primavera), até que seja concluído um determinado estágio fenológico. Para determinação da temperatura base superior, segue processo semelhante, porém, considerando um período quente (verão).

Argumenta-se que cada cultivar exige um determinado número de graus-dia para completar o ciclo vegetativo, o qual constituiria a sua "constante térmica". Assim, conhecida a "constante térmica" da cultura e as temperaturas, máxima e mínima, diárias esperadas (valores médios) em determinada área, seria fácil estimar a duração do ciclo vegetativo e estabelecer a época do plantio em função da ocasião mais interessante para a colheita. Essa técnica, evidentemente, só funcionaria a contento para culturas anuais, naquelas áreas em que as médias das temperaturas máxima e mínima (descendais ou mensais) não variassem

significativamente de um ano para outro e cujos valores diários não oscilassem muito em torno do respectivo valor médio (Varejão-Silva, 2000).

De acordo com Yang et al. (1995), além do método do menor desvio padrão em dias (Arnold, 1959), existem outros métodos também importantes para se determinar temperatura base. São eles: o menor desvio padrão em graus-dia (Magoon, Culpepper, 1932, Stier, 1939), o coeficiente de variação, em graus-dias (Nuttonson, 1958) e o coeficiente de regressão (Hoover, 1955).

2.6 Graus-dia de desenvolvimento (GDD)

A duração de cada estágio vegetativo de uma cultura varia com a espécie e as condições climáticas. Entre estas, a temperatura e as condições hídricas são as mais importantes no desenvolvimento e no estabelecimento das culturas. Em cultivos irrigados, as condições térmicas assumem maior importância, já que as necessidades hídricas são supridas pela irrigação (Mota, 1986).

Existem vários métodos que relacionam o grau de desenvolvimento de uma cultura com a temperatura do ar, sendo o mais empregado o das unidades térmicas ou graus-dia.

Graus-dia é definido como o acúmulo diário da energia que se situa acima da condição mínima e abaixo da máxima exigida pela planta (Ometto, 1981). A condição mínima ou máxima é definida como temperatura-base e a energia acumulada nesse intervalo de condição (graus-dia ou soma térmica) é a energia necessária para a planta completar determinada fase fenológica ou, mesmo, o seu ciclo total de desenvolvimento.

Os resultados das interações clima-planta foram iniciados, segundo Mota (1986), por Réaumur, em 1735, que é considerado o precursor do sistema de graus-dia ou unidades térmicas, GD. Um grau-dia, ou unidade térmica, GD, era definido por Réaumur como a temperatura média do dia. No método original

aplicado por Réaumur, a constante térmica é calculada a partir da soma das temperaturas médias diárias acima 0°C, que podia ser determinada para o ciclo total ou para cada fase. Esse método foi denominado de método direto e apresentava o inconveniente de sofrer variações segundo as localidades consideradas (Mota, 1986). De acordo com este autor, para atender ao cálculo de graus-dia para diversas localidades, deve-se usar o método residual (Arnold, 1959), que consiste no somatório das diferenças entre a temperatura média diária e a temperatura mínima necessária para uma espécie, temperatura base inferior.

Trabalhos como os de Sammis et al. (1985) e de Varejão-Silva (2000) têm demonstrado a grande utilidade do uso de graus-dia que, ao se acumularem podem ser especificados como graus-dias de desenvolvimento, GDD, para previsão das fases fenológicas, bem como zoneamento de culturas. Esta forma de “quantificar” as fases fenológicas da planta tem como característica o fato de que GDD independe da época e do local do plantio. Estes trabalhos de pesquisas têm demonstrado uma maior adaptação do ciclo de algumas culturas ao GDD do que à quantidade de dias do calendário, além de poder estimar, com facilidade, a duração do ciclo, bem como estabelecer a época de plantio em função da época mais apropriada para colheita.

Uma correção no cálculo de GDD determinado pelo método residual foi proposta por Dufault (1997), devido à redução das taxas de crescimento associadas com altas temperaturas, que propôs um modelo de ajuste dos valores de temperaturas máximas diárias quando estas são superiores à temperatura base superior. Trabalhos desenvolvidos por Butler et al. (2002a, b) utilizaram este modelo para estudos dos efeitos de crescimento e desenvolvimento de trevo (*Trifolium incarnatum* L.), cultivar Crimson clover.

Analisando as reduções das taxas de crescimento não somente em função das altas temperaturas, como das baixas, Ometto (1981) apresentou cinco variantes para a determinação dos GDD, o que pode ser observado em trabalho

realizado em Lavras, MG, com duas cultivares de cafeeiro, Acaiá Cerrado MG-1474 e Rubi MG-1192, em fase de implantação, desenvolvido por Coelho (2004).

Ometto (1981) reforçou a opinião de que, depois de realizado o cálculo das constantes térmicas por um ou dois anos, obtém-se precisão suficiente para que, acompanhando a marcha dos valores dos graus-dia, se possa prever a data da maturação (colheita) de qualquer cultura.

Outra metodologia proposta para determinação de GDD, semelhante à de Ometto (1981), foi apresentada por Snyder (1985), utilizando quatro casos distintos de determinação de graus-dia, o que pode ser verificado em trabalho com alface desenvolvido por Silva et al. (1999).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

Este trabalho foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) em uma área ao lado da estação meteorológica automática, pertencente à rede de plataforma de coleta de dados (PCD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As coordenadas geográficas da referida área são 21°14' de latitude Sul, 45°00' longitude Oeste e altitude média de 918,841 m. O solo do experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico Típico, segundo Embrapa (1999).

3.2 Clima

Aplicando-se o método de classificação climática de Köppen, apresentado por Ometto (1981), às Normais Climatológicas de Lavras, Brasil (1992), obtém-se clima Cwa, temperado chuvoso, com inverno seco. A temperatura média anual é 19,4°C, o total de precipitação anual de 1.530 mm, o total de evaporação anual de 1.034 mm e a umidade relativa média anual de 76%.

3.3 Caracterização física e química do solo

Para a caracterização física e química do solo em estudo, foram coletadas amostras em toda a área experimental, nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm. Posteriormente, as amostras foram conduzidas ao Laboratório de

Análise de Solos do Departamento de Ciência do Solo da UFLA (DCS/UFLA).
Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 Resultados da caracterização física e química do solo da área experimental*. UFLA, Lavras, MG, 2004.

Característica	Descrição	Unidade	Amostras	
			0 a 20 cm	20 a 40 cm
pH	Em água (1:2:5)	-	6	6
P	Fósforo (Mehlich)	mg dm ⁻³	11,5	4
K	Potássio	mg dm ⁻³	78	69
Ca	Cálcio	Cmol _c dm ⁻³	3,5	2,4
Mg	Magnésio	Cmol _c dm ⁻³	1,2	0,8
Al	Alumínio	Cmol _c dm ⁻³	0,1	0,1
H+Al	Ac. potencial	Cmol _c dm ⁻³	2,1	2,1
SB	Soma bases	Cmol _c dm ⁻³	4,9	3,4
(t)	CTC efetiva	Cmol _c dm ⁻³	5	3,5
(T)	CTC a pH 7,0	Cmol _c dm ⁻³	7	5,5
V	Sat. bases	%	70	61,7
M	Sat. alumínio	%	2	3
Mo	Mat. orgânica	dag kg ⁻¹	2,5	2,4
P-rem	Fósforo remanescente	mg L ⁻¹	8,3	5,8
Zn	Zinco	mg dm ⁻³	5,2	5,3
Fe	Ferro	mg dm ⁻³	28,4	26,4
Mn	Manganês	mg dm ⁻³	30,5	24
Cu	Cobre	mg dm ⁻³	5,2	5,3
B	Boro	mg dm ⁻³	0,2	0,2
S	Enxofre	mg dm ⁻³	91,5	72
Areia	-	dag kg ⁻¹	9	8
Silte	-	dag kg ⁻¹	21	24
Argila	-	dag kg ⁻¹	70	68
Textura	Classe textural	-	M. argilosa	M. argilosa

* Realizadas no DCS/UFLA

3.4 Delineamento experimental

O experimento foi montado segundo esquema constante na Figura 1, sem seguir um delineamento específico; para análise estatística foi realizado um estudo de regressão. As análises de regressão relativas ao ensaio foram realizadas com o aplicativo SigmaPlot, versão 9.01 da Jandel Scientific e, para comparações entre as regressões, foi utilizado o procedimento descrito por (Snedecor & Cochran, 1989).

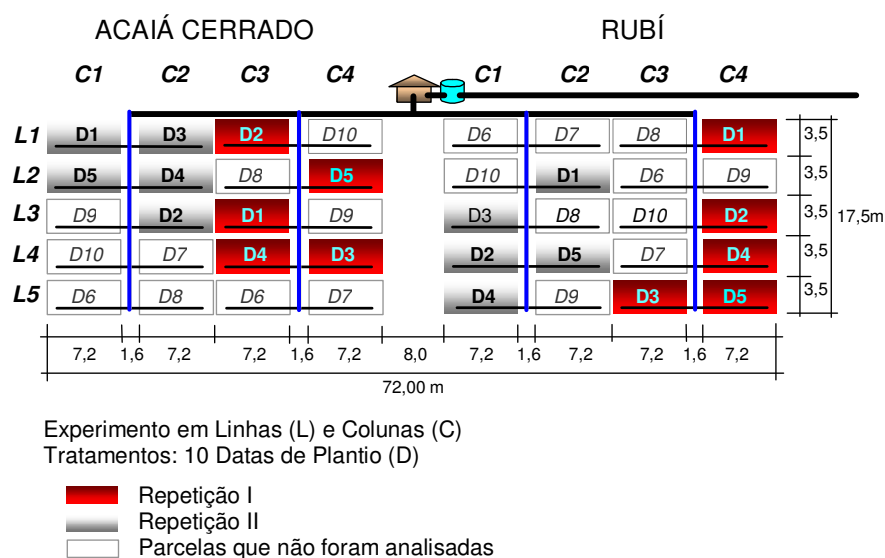


FIGURA 1 Croqui da área experimental, com representação do sistema de irrigação localizada e dos tratamentos, data de transplante (D), para as cultivares Acaiá Cerrado e Rubi.

O experimento foi formado por duas áreas, nas quais foram introduzidas duas cultivares do cafeeiro (*Coffea arabica* L.): cultivar Rubi MG-1192 e

cultivar Acaiá Cerrado MG-1474. As mudas foram produzidas com intervalos de 36 dias entre datas de semeadura. O transplântio foi feito no decorrer de um ano, a cada mês, a partir de 19 de março de 2003, quando as mudas atingiam 6 a 7 pares de folhas. As adubações, de transplântio e de manutenção, foram feitas de acordo com recomendações sobre os resultados de análise de fertilidade do solo obtidos no Laboratório de Fertilidade de Solo do Departamento de Ciências do Solo da UFLA.

Transplantaram-se vinte parcelas de cada cultivar, as quais foram identificadas pela sua data de transplântio e pela cultivar correspondente. Cada parcela era constituída por nove plantas em linha, das quais sete formaram a sua área útil. O espaçamento de transplântio foi de 3,5 x 0,80 m, para as duas cultivares, conforme representado na Figura 2. Para este trabalho foram consideradas somente cinco datas das dez transplantadas. Isto se deve ao fato de que somente as cinco primeiras datas, D1 a D5, em destaque na Figura 1, e correspondendo seqüencialmente a 19/mar/2003, 19/abr/2003, 19/mai/2003, 19/jun/2003 e 19/jul/2003 atingiram, até o período final de coleta de dados, a primeira florada. Para que as mudas pudessem desenvolver-se chegando à florada sem déficit hídrico, as áreas foram irrigadas por gotejamento com uma linha lateral por linha de plantas.

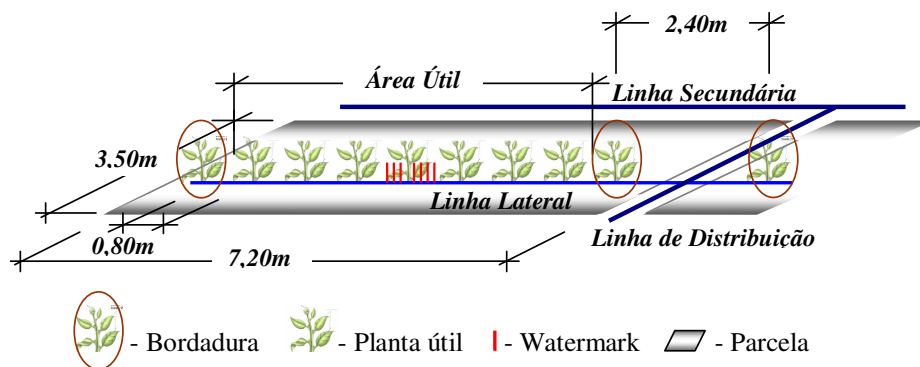


FIGURA 2 Detalhe de uma parcela experimental, com representação de área útil, dimensões, bordaduras, sistema de suprimento de água (linha lateral, de distribuição e secundária) e sensores de teor de água no solo.

3.5 Manejo da irrigação

O sistema de irrigação implantado na área experimental foi projetado para irrigar individualmente qualquer uma das parcelas do experimento. Na seqüência são apresentados os parâmetros necessários à determinação da umidade, em função do potencial matricial do solo, $\theta(\psi_m)$, e o procedimento necessário para a condução do manejo da irrigação.

3.5.1 Curvas características

Para a confecção das curvas características de retenção de água no solo da área experimental, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas camadas de 0 a 20 cm, de 20 a 40 cm e de 40 a 60 cm de profundidade. Posteriormente, as amostras foram conduzidas ao Laboratório de Hidráulica da

UFLA, para a obtenção dos pontos da curva. Com os valores das umidades obtidos e suas respectivas tensões de determinação, procedeu-se aos devidos ajustes, conforme equação proposta por van Genuchten (1980), Equação 24, utilizando-se o programa computacional SWRC, desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). As equações ajustadas, a densidade global (dg) e o coeficiente de determinação (r^2) para as três camadas do solo em estudo estão apresentados na Tabela 2.

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \cdot |\psi_m|)^n\right]^m} \quad (24)$$

em que:

$\theta(\psi_m)$: umidade do solo, em função do potencial matricial ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s : umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r : umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

ψ_m : tensão ou potencial matricial (kPa);

α : parâmetro de ajuste (kPa^{-1});

m e n: parâmetros de ajuste da equação, adimensionais.

TABELA 2 Equações de van Genuchten ajustadas, densidades globais (dg) e coeficientes de determinação (r^2), para as três camadas do solo em estudo. Lavras, MG, 2006.

Camada (cm)	Equações ajustadas	Dg (g cm ⁻³)	r^2
0 a 20	$\theta(\psi_m) = 0,22 + \frac{0,438}{\left[1 + (1,5104 \cdot \psi_m)^{1,5799}\right]^{0,367}}$	0,91	0,98
20 a 40	$\theta(\psi_m) = 0,241 + \frac{0,409}{\left[1 + (1,1303 \cdot \psi_m)^{1,5137}\right]^{0,3397}}$	0,93	0,99
40 a 60	$\theta(\psi_m) = 0,238 + \frac{0,423}{\left[1 + (1,1340 \cdot \psi_m)^{1,6297}\right]^{0,3864}}$	0,90	0,99

A representação gráfica deste ajuste pode ser verificada na Figura 3, na qual as unidades correspondentes à capacidade de campo por camada foram de 31,03% para a camada de 0 a 20 cm, 35,77% para a camada de 20 a 40 cm e 32,90% para a camada de 40 a 60 cm.

3.5.2 Condução

O momento da irrigação foi determinado com base na tensão de água no solo, obtida diretamente por meio dos sensores “Watermark” e a umidade para o cálculo da lâmina de irrigação por meio do modelo de umidade do solo em função de seu potencial matricial, $\theta(\psi_m)$, por meio do modelo proposto por van

Genuchten (1980), Equação 24. Para isso, foram instalados linearmente ao longo da linha de plantio, sete sensores “Watermark” junto à planta central da parcela de data D1 em ambas as cultivares, em uma das repetições, sendo três sensores de um lado da planta e quatro do outro lado, espaçados de 20 cm entre si e distanciados de 20 cm em relação à planta central (Figura 4). As profundidades de instalação dos sensores foram de 5, 15, 25, 35, 40, 50 e 60 cm e as lâminas de irrigação calculadas por meio da data D1, em ambas as cultivares, foram usadas para toda a área, com a cultivar Acaia e Rubi, respectivamente.

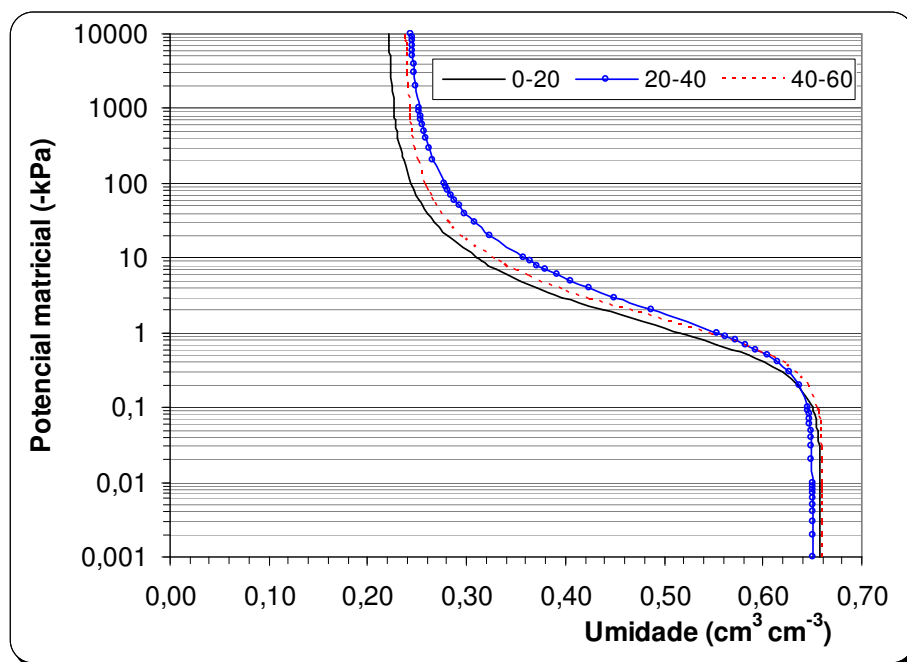


FIGURA 3 Curvas de retenção de água no solo para as três camadas estudadas do Latossolo Vermelho Distroférico Típico. Lavras, MG. 2006.



FIGURA 4 Sensores de umidade do solo tipo “Watermark” instalados junto à planta central, a 5, 15, 25, 35, 40, 50 e 60 cm de profundidade, para o controle da irrigação e monitoramento do fluxo de água no solo e haste do Profile Probe. Lavras, MG, 2006.

A irrigação foi realizada de forma a repor a variação de armazenamento entre as tensões de 10 kPa e 20 kPa na zona do sistema radicular, que foi estratificada em duas subcamadas, 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, monitoradas pelos sensores “Watermark” instalados a 5 cm e 15 cm de profundidade para a camada de 0 a 20 cm, a 25 cm e 35 cm profundidade para a camada de 20 a 40 cm. Os sensores instalados a 50 cm e 60 cm de profundidade foram usados somente para monitorar o fluxo de água no solo a 55 cm de profundidade, cujos valores foram usados no cálculo do balanço hídrico. A lâmina de irrigação foi determinada,

portanto, considerando um perfil de 40 cm de profundidade por meio das Equações 25, 26 e 29. O tempo de funcionamento do sistema de irrigação foi determinado pela Equação 30, de acordo com Cabello (1996).

O sistema de irrigação instalado na área experimental foi composto de linhas de tubo flexível de polietileno de 16 mm de diâmetro, com gotejadores auto-compensantes (5 a 35 m.c.a), apresentando vazão nominal de 1,6 L h⁻¹ e emissores espaçados de 30 cm.

$$LL = (\theta_{cc} - \theta_{atual}) \cdot z \cdot Pw \quad (25)$$

em que:

LL: lâmina líquida de irrigação em cada parcela (mm);

θ_{cc} : umidade na capacidade de campo (cm³ cm⁻³);

θ_{atual} : umidade no momento de irrigar (cm³ cm⁻³);

z: profundidade do sistema radicular (mm)

Pw: fração de área molhada (decimal)

$$LB = \frac{LL}{(1 - k) \cdot CU} \quad (26)$$

em que :

LB: lâmina bruta de irrigação (mm);

CU: coeficiente de uniformidade do sistema de irrigação (decimal);

k: constante que leva em conta a salinização do solo, bem como a eficiência de aplicação do sistema. É adotado o maior dos valores obtidos através das Equações 4 e 5 seguintes:

$$k = 1 - Ea \quad (27)$$

$$k = LR = \frac{CEi}{(5 \cdot CEe - CEi)} \quad (28)$$

em que:

Ea: eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação considerada como 0,90;

LR: lâmina de lavagem do solo, caso tenha problemas com salinidade (mm);

CEi: condutividade elétrica da água de irrigação (dS m⁻¹);

CEe: condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (dS m⁻¹).

$$LBm\u00e9dia = LBm\u00e9dia_{0-20cm} + LBm\u00e9dia_{20-40cm} \quad (29)$$

em que:

LBm\u00e9dia: soma das lâminas brutas m\u00e9dias obtidas de 0 a 40 cm (mm);

LBm\u00e9dia_{0-20cm}: lâmina bruta m\u00e9dia de 0 a 20 cm (mm);

LBm\u00e9dia_{20-40cm}: lâmina bruta m\u00e9dia de 20 a 40 cm (mm).

$$T = \frac{LBm\u00e9dia \cdot Sp}{e \cdot qa} \quad (30)$$

em que:

T: tempo de funcionamento do sistema de irrigação (h);

Sp: \u00e1rea ocupada por planta (m²);

e: n\u00famero de emissores por planta;

qa: vaz\u00e3o m\u00e9dia dos emissores (L h⁻¹).

Para verificar o desempenho do sistema de irriga\u00e7\u00e3o, foram realizados testes para a determina\u00e7\u00e3o da vaz\u00e3o nominal do gotejador (qa) e do coeficiente

de uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação (CU). Para isso, foi adaptado o procedimento recomendado por Merriam & Keller (1978), citados por Cabello (1996), em que se escolhe uma subunidade e nela selecionam-se quatro laterais: a primeira, a situada a 1/3 do início, a situada a 2/3 e a última. Em cada lateral, selecionam-se quatro emissores: o primeiro, o situado a 1/3, o situado a 2/3 e o último. Coletam-se as vazões desses emissores e, a partir da Equação 31, calcula-se o coeficiente de uniformidade.

Como cada subunidade do sistema de irrigação, neste caso a parcela, é constituída de cinco linhas laterais, optou-se por selecioná-las, todas, para serem usadas no teste.

$$CU = \frac{q_{25}}{qa} \quad (31)$$

em que:

CU: coeficiente de uniformidade de distribuição (decimal);

q_{25} : média das 25% menores vazões coletadas ($L h^{-1}$);

qa : média das vazões coletadas ($L h^{-1}$).

Além do coeficiente de uniformidade, foi determinado também o coeficiente de variação total de vazão (CVt), conforme metodologia apresentada por Bralts & Kesner (1978), descrita por Cabello (1996). O coeficiente de variação total é a relação entre o desvio padrão das vazões e a vazão média, que indica como está a uniformidade da vazão na subunidade. Cabello (1996) apresenta uma tabela classificando a uniformidade de acordo com o valor do CVt. Segundo essa tabela, estando o CVt acima de 0,4, a uniformidade é inaceitável; de 0,4 a 0,3 é baixa; de 0,3 a 0,2 é aceitável; de 0,2 a 0,1 é muito boa e de 0,1 a 0 é excelente.

3.6 Determinação de graus-dia de desenvolvimento (GDD)

Para o cálculo de graus-dia, foram usadas temperaturas máximas e mínimas do dia, coletadas na estação meteorológica automática, da rede de plataforma de coleta de dados (PCD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que se encontra ao lado da área experimental. Os valores usados de temperaturas base, inferior e superior foram determinados em item específico desta pesquisa.

3.6.1 Método do menor desvio padrão, em dias

Este método também é conhecido como método residual, apresentado por Arnold (1959) segundo a Equação 32.

$$GD = \frac{TM + Tm}{2} - Tb \quad (32)$$

em que:

GD: graus-dia (°C);

TM: temperatura máxima do dia (°C);

Tm: temperatura mínima do dia (°C);

Tb: temperatura base inferior (°C).

3.6.2 Método apresentado por Ometto (1981)

Segundo Ometto (1981), existe um valor de energia mínima que aciona os dispositivos metabólicos da planta, chamado de temperatura base inferior

(Tb), em que somente estados energéticos acima deste limite são propícios ao crescimento e ao desenvolvimento do vegetal estudado.

O nível energético máximo, acima do qual a planta estanca suas atividades metabólicas, é chamado de temperatura base superior (TB) e que compreende o limite superior de suporte energético para aquela planta.

O intervalo de tempo durante aquele dia, em que a energia do meio ficou abaixo do valor mínimo necessário à planta é desprezado, pois ela estava com suas funções vitais praticamente estacionadas. O mesmo acontece quando a energia do meio encontra-se acima do valor máximo admissível para aquela planta. O “quantum” de energia que realmente pode interagir com a planta, trazendo estímulo aos processos metabólicos, fica entre os níveis mínimo e máximo basais. Portanto, os valores de temperatura do ar inferiores ao mínimo basal e os superiores ao máximo basal, são retirados do cálculo de graus-dia por se constituírem em valores deficitários, no caso do mínimo e excessivos, no caso do máximo. Tais situações podem ser verificadas nas Figuras 5, 6, 7, 8 e 9.

Dessa forma, Ometto (1981) apresenta as seguintes alternativas de cálculo do “acúmulo de energia” ou graus-dia, sempre considerando o tempo unitário de um dia.

Caso 1: $T_B > T_M > T_m > T_b$

$$GD = \frac{T_M - T_m}{2} + T_m - T_b \quad (33)$$

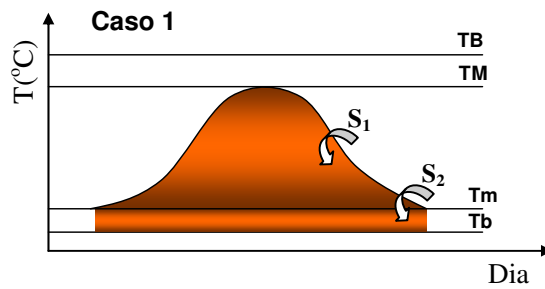


FIGURA 5 Representação esquemática da curva de temperaturas ocorrentes no dia, considerando $T_B > T_M > T_m > T_b$, mostrando duas áreas úteis, S_1 e S_2 (em destaque).

Caso 2: $T_B > T_M > T_b > T_m$

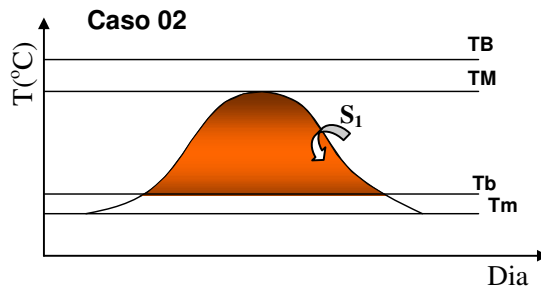


FIGURA 6 Representação esquemática da curva de temperaturas ocorrentes no dia, considerando $T_B > T_M > T_b > T_m$, mostrando uma única área útil S_1 (em destaque).

$$GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2 \cdot (TM - Tm)} \quad (34)$$

Caso 3: $TB > Tb > TM > Tm$

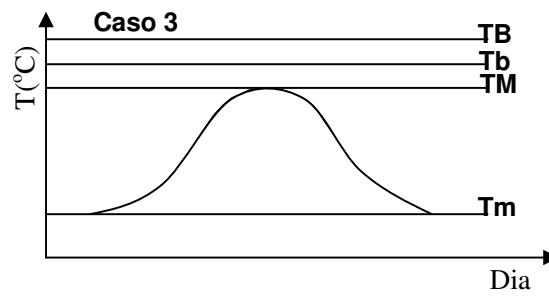


FIGURA 7 Representação esquemática da curva de temperaturas ocorrentes no dia, considerando $TB > Tb > TM > Tm$, mostrando não haver nenhuma área útil.

$$GD = 0 \quad (35)$$

Caso 4: $TM > TB > Tm > Tb$

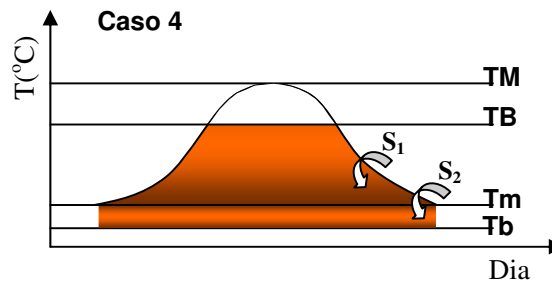


FIGURA 8 Representação esquemática da curva de temperaturas ocorrentes no dia, considerando $TM > TB > Tm > Tb$, mostrando duas áreas úteis, S_1 e S_2 (em destaque).

$$GD = \frac{2 \cdot (TM - Tm) \cdot (Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)}{2 \cdot (TM - Tm)} \quad (36)$$

Caso 5: $TM > TB > Tb > Tm$

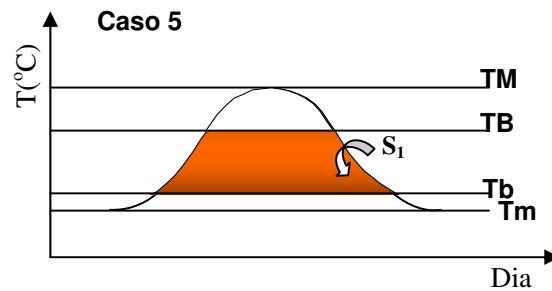


FIGURA 9 Representação esquemática da curva de temperaturas ocorrentes no dia, considerando $TM > TB > Tb > Tm$, mostrando uma única área útil, S_1 (em destaque).

$$GD = \frac{1}{2} \cdot \frac{(TM - Tb)^2 - (TM - TB)^2}{TM - Tm} \quad (37)$$

em que:

GD: graus-dia (°C);

TM: temperatura máxima do dia (°C);

Tm: temperatura mínima do dia (°C);

Tb: temperatura base inferior (°C);

TB: temperatura base superior (°C).

3.6.3 Método apresentado por Snyder (1985)

Segundo Snyder (1985), os graus-dia são determinados considerando-se quatro casos distintos:

Caso 1: TB>TM>Tm>Tb

Para este caso, os valores de graus-dia são determinados de acordo com a Equação 32, Equação de Arnold (1959).

Caso 2: TB>TM>Tb>Tm

Para este caso, os valores de graus-dia serão determinados de acordo com a Equação 38, sendo as variáveis θ , M e W determinadas usando-se as Equações 39, 40 e 41, respectivamente.

$$GD = \frac{(M - Tb) \cdot (\frac{\pi}{2} - \theta) + W \cdot \cos(\theta)}{\pi} \quad (38)$$

$$\theta = \arcsen\left(\frac{Tb - M}{W}\right) \quad (39)$$

$$M = \frac{T \max + T \min}{2} \quad (40)$$

$$W = \frac{T \max - T \min}{2} \quad (41)$$

Caso 3: $TM > TB > Tm > Tb$

Para este caso, os valores de graus-dia serão determinados de acordo com a Equação 42, sendo a variável ϕ determinada utilizando-se a Equação 43.

$$GD = M - Tb - \frac{(M - TB) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + W \cdot \cos(\phi)}{\pi} \quad (42)$$

$$\phi = \arcsen\left(\frac{TB - M}{W}\right) \quad (43)$$

Caso 4: $TM > TB > Tb > Tm$

Para este caso, os valores de graus-dia serão determinados de acordo com a Equação 44.

$$GD = \frac{(M - Tb) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + W \cdot \cos(\theta)}{\pi} - \frac{(M - TB) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + W \cdot \cos(\phi)}{\pi} \quad (44)$$

em que:

GD: graus-dia (°C);

TM: temperatura máxima do dia (°C);

Tm: temperatura mínima do dia (°C);

Tb: temperatura base inferior (°C);

TB: temperatura base superior (°C);

W, θ e ϕ : variáveis do modelo.

3.6.4 Método apresentado por Dufault (1997)

Os graus-dia calculados por este método podem ser feitos por meio de dois casos distintos.

Caso 1: $TM \leq TB$

Usado quando a temperatura máxima do dia não exceder a temperatura base superior. Neste caso, basta subtrair da temperatura média diária o valor da temperatura base inferior, Equação 32, Equação de Arnold (1959).

Caso 2: $TM > TB$

Usado quando a temperatura máxima do dia exceder a temperatura base superior, o que faz com que ocorra um crescimento reduzido associado a altas temperaturas, Equação 45. Neste caso, será introduzido um fator de ajuste para a temperatura máxima do dia, de acordo com a Equação 46.

$$GD = \frac{T_{ADJ-\max} + Tm}{2} - Tb \quad (45)$$

$$T_{AJD-\max} = TB - (TM - TB) \quad (46)$$

em que:

GD: graus-dia ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{\text{ADJ-max}}$: temperatura máxima diária ajustada ($^{\circ}\text{C}$);

Tb: temperatura base inferior ($^{\circ}\text{C}$);

TB: temperatura base superior ($^{\circ}\text{C}$);

TM: temperatura máxima do dia ($^{\circ}\text{C}$);

Tm: temperatura mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$).

3.7 Métodos de determinação da temperatura base

Na literatura, têm-se encontrado basicamente quatros métodos de determinação de temperatura base: menor desvio padrão em graus-dia (SDgd), menor desvio padrão em dias (SDd), coeficiente de variação em graus-dia (CVgd) e coeficiente de regressão (Re). Foram adotadas, nesta pesquisa, as formulas matemáticas apresentadas por Yang et al. (1995) e o método apresentado por Ometto (1981), cujo propósito foi de gerar a temperatura base para o café arábica, desde o transplântio até a primeira florada.

3.7.1 Método do menor desvio padrão, em graus-dia (SDgd)

Neste método, a temperatura base é selecionada assim que a variação resultante em graus-dia de desenvolvimento (GDD), usando uma série de plantios, é minimizada, ou seja, para uma série de temperaturas base, aquela que resultar em GDD com no menor desvio padrão é selecionada como temperatura base. O desvio padrão em graus-dia é definido de acordo com a Equação 47,

pela qual Yang et al. (1995), ao desenvolvê-la matematicamente, chegaram a uma expressão de temperatura base, Equação 48.

$$SDgd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (GDi - \bar{GDD})^2}{n-1}} \quad (47)$$

em que:

SDgd: desvio padrão, em graus-dia;

GDi: graus-dia de cada época;

\bar{GDD} : média geral de graus-dia para todas as épocas;

n: número de séries de plantio.

$$Tb = \frac{\sum_{i=1}^n (Ti \cdot di) \sum_{i=1}^n di - n \sum_{i=1}^n (di^2 \cdot Ti)}{\left(\sum_{i=1}^n di \right)^2 - n \sum_{i=1}^n di^2} \quad (48)$$

em que:

Tb: temperatura base;

Ti: temperatura média de cada época específica;

n: número de épocas de plantio;

di: número de dias requerido para alcançar um estágio de desenvolvimento em cada série de plantio específica.

3.7.2 Método do menor desvio padrão, em dias (SDd)

Arnold (1959) sugeriu que o uso dessas unidades de calor não considera o erro em unidades de calor como tal, mas, no erro em dias que esta unidade de calor representa. Dessa forma, ele definiu o menor desvio padrão em dias, de acordo com a Equação 49, pela qual Yang et al. (1995), ao desenvolvê-la matematicamente, chegaram a uma expressão de temperatura base, Equação 50.

$$SDd = \frac{SDgd}{T - Tb} \quad (49)$$

em que:

SDd: desvio padrão, em dias;

SDgd: desvio padrão, em graus-dia;

T: temperatura média para todas as séries de plantios;

Tb: temperatura base.

$$Tb = T - \frac{\left(\sum_{i=1}^n ti \cdot di \right)^2 - n \sum_{i=1}^n (ti^2 \cdot di^2)}{n \sum_{i=1}^n (di^2 \cdot ti) - n \sum_{i=1}^n (ti \cdot di) \sum_{i=1}^n di} \quad (50)$$

em que:

Tb: temperatura base;

T: temperatura média para todas as séries de plantio;

n: número de séries de plantio;

di: número de dias requerido para alcançar um estágio de desenvolvimento em cada série de plantio específica;

ti: diferença entre a temperatura média para todas as séries de plantio (T) e a temperatura média em uma série específica (TMi).

3.7.3 Método do coeficiente de variação, em graus-dia (CVgd)

Os métodos descritos acima de, SDgd e SDd, dão magnitudes absolutas da variação em GDD e em dias, mas não menciona magnitudes relativas da variação. Em função disso, Nuttonson (1958), citado por Yang et al. (1995), definiu o coeficiente de variação como apresentado pela Equação 51. Os mesmos autores desenvolveram esta equação e apresentaram a fórmula matemática de temperatura base para este método, Equação 52.

$$CVgd = \frac{SDd}{Xd} \cdot 100\% \quad (51)$$

em que:

CVgd: coeficiente de variação, em graus-dia;

SDd: desvio padrão em dias;

Xd: número médio de dias para alcançar um estágio de desenvolvimento.

$$Tb = \frac{\sum_{i=1}^n (Ti \cdot di^2) \sum_{i=1}^n (Ti \cdot di) - \sum_{i=1}^n di \sum_{i=1}^n (Ti^2 \cdot di^2)}{\sum_{i=1}^n di^2 \sum_{i=1}^n (Ti \cdot di) - \sum_{i=1}^n di \sum_{i=1}^n (Ti \cdot di^2)} \quad (52)$$

em que:

Tb: temperatura base;

Ti: temperatura média para cada série de plantio;

n: número de séries de plantio;

di: número de dias requerido para alcançar um estágio de desenvolvimento em cada série de plantio específica.

3.7.4 Método do coeficiente de regressão (Re)

Nos métodos anteriores, pode acontecer da temperatura base que gerou os GDD com a menor variação ser muito abaixo de zero. Isso se deve ao fato dos três métodos anteriores serem métodos empíricos, o que irá levar a uma nova seleção de valores de temperatura base para outro processo iterativo de cálculo. Isso dificulta a seleção da temperatura base correta que gera os GDD ou dias com a menor variação.

Em compensação às falhas dos três métodos discutidos acima, Hoover (1955), citado por Yang et al. (1995), desenvolveu o método do coeficiente de regressão para calcular a temperatura base de acordo com a Equação 53. Os mesmos autores desenvolveram esta equação e apresentaram a fórmula matemática de temperatura base para este método, Equação 54.

O modelo estudado envolve a relação entre a temperatura média e GDD por meio de uma regressão linear em que a temperatura média é a variável independente e GDD a variável dependente.

Teoricamente, se a temperatura selecionada fosse muito alta, o coeficiente de regressão no modelo era positivo; caso contrário, era negativo. Quando o coeficiente de regressão era zero, era considerado que a temperatura selecionada era a temperatura base.

$$Y_i = (T_i - T_b) \cdot d_i \quad (53)$$

em que:

Yi: graus-dia para cada série específica;

Ti: temperatura média para cada série específica;

di: número de dias requeridos para alcançar um estágio de desenvolvimento em cada época específica.

Tb: temperatura base.

$$Tb = \frac{\sum_{i=1}^n Ti \sum_{i=1}^n (di \cdot Ti) - n \sum_{i=1}^n (di \cdot Ti^2)}{\sum_{i=1}^n di \sum_{i=1}^n Ti - n \sum_{i=1}^n (di \cdot Ti)} \quad (54)$$

em que:

Tb: temperatura base;

Ti: temperatura média para cada série específica;

n: número de séries de plantio;

di: número de dias requeridos para alcançar um estágio de desenvolvimento em cada época específica.

3.7.5 Método apresentado por Ometto (1981)

O uso deste método leva em consideração cinco casos distintos para a determinação das temperaturas base, inferior (Tb) e superior (TB).

3.7.5.1 Temperatura base inferior (Tb)

Para calcular a temperatura base inferior (Tb), foi estabelecido um intervalo entre dois períodos distintos de transplântio, em que não houve a

possibilidade de ocorrerem temperaturas suficientemente elevadas e que poderiam alcançar a temperatura base superior (TB). O intervalo escolhido foi no inverno-primavera, considerando as datas de transplantes D4 (Período1) e D5 (Período 2).

Atingindo a primeira florada, os números de graus-dia tendem a ser semelhantes. Desse modo, considera-se que o número de dias para um período (N_1) está para o outro (N_2), assim como as ocorrências da temperatura mínima (T_{m1}) e máxima (T_{M1}) em um período, estão para as do outro período (T_{m2} e T_{M2}), respectivamente.

3.7.5.2 Temperatura base superior (TB)

A sua determinação segue o mesmo desenvolvimento de determinação da temperatura base inferior (Tb) do item anterior. Porém, deve-se considerar o período de temperaturas elevadas no processo de cálculo. Neste caso particular, o valor obtido de temperatura base inferior irá entrar no cálculo da temperatura base superior.

3.8 Balanço hídrico

O consumo de água pela cultura foi determinado pelo método do balanço hídrico do solo, que se baseia na utilização da equação da conservação de massa, que mostra que a soma algébrica dos fluxos da água num determinado volume de solo é igual à variação da quantidade de água nele armazenada num dado intervalo de tempo (Rose & Stern, 1967), conforme Equação 55.

$$P + I \pm S - ET \pm D = \pm \Delta A \quad (55)$$

em que:

P: precipitação pluviométrica efetiva (mm);

I: irrigação (mm);

S: deflúvio superficial (mm);

ET: evapotranspiração da cultura (mm);

D: drenagem interna (mm);

ΔA : variação de armazenamento (mm).

Para efeito de balanço hídrico, em solos cultivados, necessita-se que a profundidade considerada para o volume de controle corresponda à profundidade efetiva do sistema radicular (Libardi, 1999). No caso do café, Matiello et al. (1987) recomendam, para profundidade efetiva do sistema radicular, 40 cm, porém, neste trabalho, foi considerado, para o elemento de volume de solo em estudo, um 'Z' correspondente de 55 cm, como representado na Figura 10. Nesta figura, podem-se observar os componentes do balanço hídrico do solo, assim como a presença de equipamentos que foram usados para determinação de alguns parâmetros do balanço hídrico, que serão descritos a seguir.

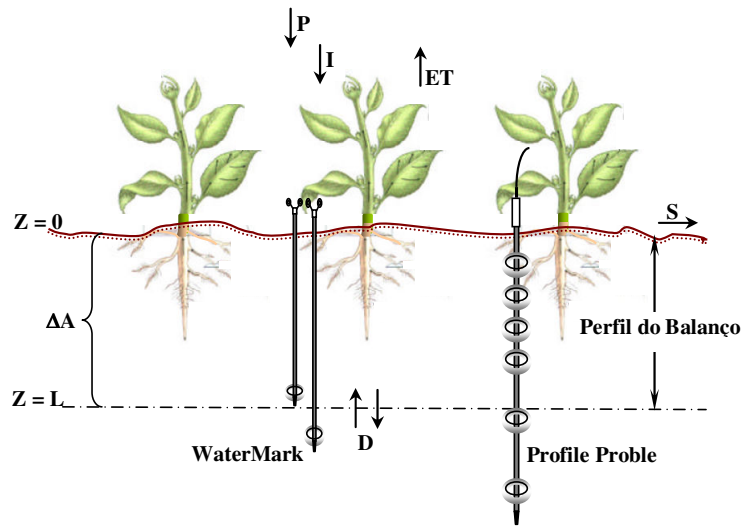


FIGURA 10 Esquema do elemento de volume de solo considerado para o balanço hídrico sob condições de campo.

3.8.1 Precipitação (P)

A contabilização da entrada de água por precipitação foi obtida por meio de dados fornecidos pela plataforma de coleta instalada próximo à área experimental.

3.8.2 Irrigação (I)

As lâminas diárias de irrigação foram obtidas com base na metodologia apresentada por (Cabello, 1996), conforme descrito no item 3.5.2.

3.8.3 Deflúvio superficial (S)

Este componente será positivo quando decorrente da contribuição a montante e negativo quando refletir perdas de água devido ao escoamento superficial.

No presente trabalho este componente não foi considerado no cálculo do balanço hídrico devido à grande quantidade de dados levantados diariamente ao longo do tempo e devido à dificuldade em se determinar o escoamento superficial. Com isso, optou-se por não realizar o balanço hídrico quando ocorressem precipitações.

3.8.4 Drenagem interna ou ascensão capilar (D)

Este componente pode ser positivo, se for decorrente da ascensão capilar, entrada de água, ou negativa, se originada pela drenagem interna, saída de água. Na profundidade e tempo considerados, ele pode ser estimado pela equação de Darcy-Buckingham, (Equação 56).

$$q_z = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_L \quad (56)$$

em que:

$K(\theta)$: condutividade hidráulica em função da umidade do solo (mm d^{-1});

$\partial\psi/\partial z$: gradiente de potencial total na profundidade de controle (adimensional).

Os valores de $\partial\psi/\partial z$, gradiente de potencial total, são aproximados pela média do gradiente de potencial total no início (*i*) e no final (*f*) de dado período, conforme Equação 57.

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\left[(\psi_{mc} + \psi_{gc}) - (\psi_{mb} + \psi_{gb}) \right]_i + \left[(\psi_{mc} + \psi_{gc}) - (\psi_{mb} + \psi_{gb}) \right]_f}{2 \cdot \Delta z} \quad (57)$$

em que:

ψ_{mc} : potencial matricial da água no solo na profundidade 'c' (kPa);

ψ_{mb} : potencial matricial da água no solo na profundidade 'b' (kPa);

ψ_{gc} : potencial gravitacional da água no solo na profundidade 'c' (kPa);

ψ_{gb} : potencial gravitacional da água no solo na profundidade 'b' (kPa);

i, f : índices que indicam instante inicial e final, respectivamente.

Para este trabalho, os valores dos índices 'c' e 'b' foram, respectivamente, 50 cm ou 4,9 kPa e 60 cm ou 5,9 kPa para um ∂z de 10 cm ou 0,98 kPa.

3.8.4.1 Condutividade hidráulica [K(θ)]

A condutividade hidráulica como função do teor de água no solo não saturado foi determinada pela metodologia de Mualem (1976), expressa pela Equação 58. A adoção dessa metodologia deve-se ao fato de outras metodologias para a determinação da condutividade hidráulica em campo terem como limite inferior a capacidade de campo e na prática, na maioria das vezes, trabalha-se com valores de umidades inferiores à capacidade e campo.

$$K(\theta) = K_o \cdot w^L \left[1 - \left(1 - w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (58)$$

em que:

Ko: condutividade hidráulica do solo saturado (mm d^{-1});

L: parâmetro empírico, sendo aproximadamente 0,5 para a maioria dos solos;

m: parâmetro de ajuste da equação (adimensional).

O parâmetro 'w' da Equação 58 é calculado conforme Equação 59.

$$w = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (59)$$

em que:

θ : umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r : umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s : umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada com o uso do Permeômetro de Guelph, de furo e de carga hidráulica constante e que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático, ou seja, "field saturated hydraulic conductivity" – kfs, (Figura 11).

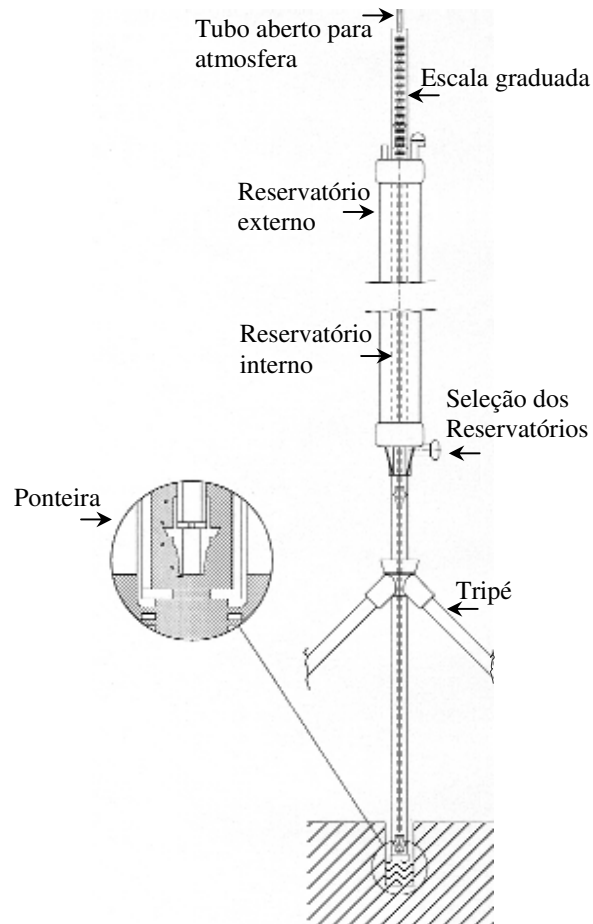


FIGURA 11 Permeômetro de Guelph e as principais partes constituintes.

Para os cálculos de K_o , foram feitos ensaios com duas cargas hidráulicas, H_1 (5 cm) e H_2 (10 cm) e, conforme a situação, pode-se usar a Equação 60 de duas formas distintas.

$$K_o = (0,0041 \cdot A \cdot R_2) - (0,0054 \cdot A \cdot R_1) \quad (60)$$

em que:

K_0 : condutividade hidráulica saturada (cm s^{-1});

A : área do reservatório de menor ou maior diâmetro (cm^2);

R_1 : fluxo na condição de carga hidráulica mínima H_1 , (cm s^{-1});

R_2 : fluxo na condição de carga hidráulica máxima H_2 , (cm s^{-1}).

0,0041 e 0,0054: constantes do Permeômetro de Guelph.

A primeira situação de uso é quando se atribui ao parâmetro 'A' um valor de $35,24 \text{ cm}^2$, quando se utiliza o reservatório de maior diâmetro (reservatório externo) e $2,22 \text{ cm}^2$ para a segunda situação, quando se utiliza o reservatório de menor diâmetro.

Para esta determinação, utilizou-se a primeira situação, trabalhando uma interface de 55 cm de profundidade, com o valor médio da condutividade hidráulica saturada obtida pela média de três repetições na área experimental.

3.8.5 Evapotranspiração (ET)

Este componente foi determinado por diferença, por meio da equação simplificada para o balanço hídrico, visto que os outros componentes da equação foram determinados mediante a metodologia descrita anteriormente.

A avaliação da evapotranspiração foi realizada desde o transplântio até a primeira florada de cada data de transplântio. Este monitoramento foi realizado de 19 de março de 2003 a 26 de setembro de 2004.

3.8.6 Variação de armazenamento (ΔA)

A componente variação de armazenamento foi determinada utilizando-se os dados de umidade volumétrica obtidos pelas leituras diárias com o sensor

“Profile Probe” até a profundidade de 60 cm, cuja haste de medição possui, até esta profundidade, quatro pares de sensores distanciados de 10 em 10 cm até 40 cm de profundidade, seguidos por um par de sensores a 60 cm e outro a 100 cm de profundidade. Este último par não foi utilizado neste trabalho (Figura 12). Para sua utilização, foi realizada uma calibração do aparelho para o solo do experimento.

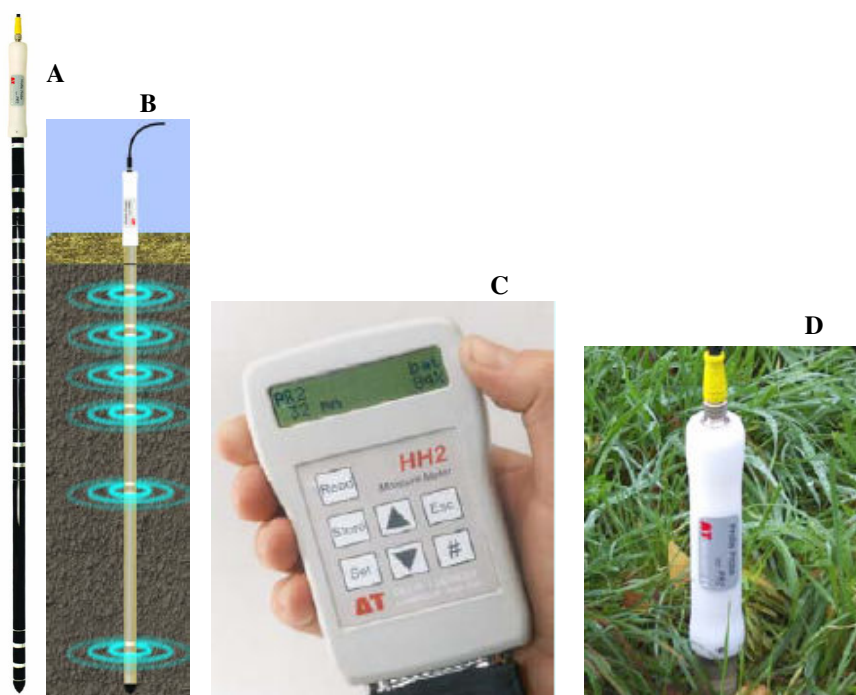


FIGURA 12 Partes constituintes do Profile Probe, retiradas de informações do fabricante, Delta-T Devices – PR2 Profile Probe Systems. A) haste com sensores a 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm de profundidade; B) haste embutida em um tubo de acesso que fica instalado no solo com demonstração do princípio de funcionamento; C) leitor digital para coleta e armazenamento de dados; D) vista parcial da haste embutida no tubo de acesso instalado no solo.

3.8.6.1 Calibração do Profile Probe

Esta calibração deve ser feita quando o intuito é maximizar a precisão da conversão de voltagem (V) emitida pela sonda de perfil (Profile Probe) em teor de água no solo. Ela pode ser feita para um solo específico ou um solo generalizado.

Teoricamente, se for feita uma calibração de um solo específico sem erros adicionais, as leituras feitas em um tubo de acesso que não está perfeitamente instalado no solo provocam um erro de medida para este solo específico. Na prática, os erros podem ser significantes, associados com o processo de calibração e a amostra que foi usada para calibração diferirá do solo de campo. Ao associar-se isso com erros de inserção do tubo de acesso, os erros reais associados com as leituras de umidade do solo podem, no caso de solos agrícolas normais, se foi usada uma calibração generalizada, alcançar erros típicos em torno de $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Em especificações do fabricante são citados erros de $\pm 5\%$ para uma calibração generalizada. Estes são erros de instrumento e não incluem nenhum erro provocado pela instalação.

A meta de calibração, segundo o fabricante, é gerar dois parâmetros, a_0 e a_1 , que descrevem as propriedades dielétricas do solo, as quais podem gerar uma conversão de Volts produzidos pela sonda de perfil para umidade do solo. Estes dois parâmetros são derivados de uma fórmula combinada simples, que relaciona o conteúdo de água do solo (θ) com a propriedade dielétrica do mesmo, chamada índice refrativo, aproximadamente equivalente a $\sqrt{\epsilon}$ (Equação 61.)

$$\sqrt{\epsilon} = a_0 + a_1 \cdot \theta \quad (61)$$

em que:

ε : constante dielétrica;

a_0 e a_1 : parâmetros da calibração do Profile Probe (adimensionais);

θ : umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

A relação entre a produção de Volts através da sonda de perfil e a raiz quadrada da constante dielétrica, ($\sqrt{\varepsilon}$), é mostrada pelo polinômio expresso na Equação 62. Esta relação pode ser muito precisa para valores até $0,7 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

$$\sqrt{\varepsilon} = 0,65 + 13,6 \cdot V - 29,9 \cdot V^2 + 72,5 \cdot V^3 \quad (62)$$

em que:

ε : constante dielétrica;

V: volts.

A Equação 62 ainda pode ser expressa na forma da Equação 63, para valores de umidade entre $0,05$ e $0,3 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

$$\sqrt{\varepsilon} = 0,67 + 10,8 \cdot V \quad (63)$$

A conversão polinomial que foi usada neste trabalho, para uma sonda de perfil inserida em um tubo de acesso é feita pela Equação 64.

$$\theta_V = \frac{0,65 + 13,6 \cdot V - 29,9 \cdot V^2 + 72,5 \cdot V^3 - a_0}{a_1} \quad (64)$$

em que:

θ_v : umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

V: volts;

a_0 e a_1 : parâmetros de calibração do Profile Probe (adimensionais).

Para um solo mineral generalizado, o fabricante recomenda usar a Equação 65.

$$\theta_{\min} = -0,113 + 1,62 \cdot V - 3,56 \cdot V^2 + 8,63 \cdot V^3 \quad (65)$$

em que:

θ_{\min} : umidade volumétrica para solo mineral ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

V: volts.

Para um solo orgânico, o fabricante recomenda usar a Equação 66.

$$\theta_{\text{org}} = -0,084 + 1,77 \cdot V - 3,88 \cdot V^2 + 9,42 \cdot V^3 \quad (66)$$

em que:

θ_{org} : umidade volumétrica para o solo orgânico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

V: volts.

Para esta calibração, na ausência do ThetaProbe, recomendado pelo fabricante, foram coletadas amostras de solo em camadas equivalentes às mesmas profundidades dos sensores na haste do Profile Probe, até 60 cm de profundidade. Com estas amostras, foram determinadas as umidades base volume, pelo método padrão de estufa, assim como as respectivas densidades

aparentes, sendo os valores médios provenientes de três repetições. De posse desses valores e usando o suplemento ‘Solver’ das planilhas eletrônicas do Excel, foi desenvolvida uma planilha de cálculo na qual, por meio da minimização do erro entre os valores de umidades volumétricas obtidas pelo processo gravimétrico e as obtidas pela Equação 64, determinaram-se os parâmetros a_0 e a_1 .

3.9 Coeficiente de cultura (Kc)

Uma vez obtidos os valores de evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência, pode-se determinar o coeficiente de cultura, utilizando-se a Equação 67.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (67)$$

em que:

Kc: coeficiente de cultura;

ETc: evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹);

ETo: evapotranspiração do cultivo de referência (mm d⁻¹).

3.10 Coeficiente de cultura (Kc) versus graus-dia de desenvolvimento (GDD)

A relação de coeficiente de cultura com graus-dia de desenvolvimento foi determinada pelo melhor ajuste dos possíveis modelos matemáticos com auxílio do Software da Mathsoft Engineering & Education, Inc., Mathcad, version 12.0.

3.11 Variáveis do crescimento vegetativo

Para este estudo, foram registrados os dados climáticos desde o transplântio até a primeira florada, com acompanhamento das variáveis de crescimento, paralelamente à determinação do consumo médio de água em cada tratamento.

O cafeeiro foi transplântado em 19 de março de 2003 e, a partir de 31 de julho de 2003, começou a ser avaliado pelas variáveis: altura de plantas, diâmetro de caule e copa e comprimento do ramo plagiotrópico. Inicialmente, as avaliações foram feitas mensalmente, devido às reduzidas taxas de crescimento em função das baixas temperaturas. A partir de 26 de setembro de 2003, com a aceleração do desenvolvimento vegetativo das plantas, associada à elevação das temperaturas, os intervalos entre as medições reduziram para quinze dias, sendo feitas medições na planta central de cada parcela analisada, duas repetições, tanto para o cafeeiro 'Rubi' como para o 'Acaiaí Cerrado'.

A altura de planta foi realizada com auxílio de uma trena, medindo-se desde a superfície do solo até o ápice da planta.

O diâmetro de caule foi medido com um paquímetro, tomando-se o cuidado de sempre coletar os dados no mesmo ponto de referência. As medidas foram feitas à altura do terceiro internódio do ramo ortotrópico.

A medição do diâmetro de copa iniciou-se no momento em que a planta apresentou uma copa bem definida. As medidas foram feitas também com auxílio de uma trena, no sentido transversal à linha de plantio.

Também com o auxílio de uma trena, foram feitas medidas do comprimento dos ramos plagiotrópicos, quando as plantas emitiram o primeiro par de ramos plagiotrópicos, sendo monitorado apenas um ramo por planta.

3.12 Análise dos dados

Os dados experimentais foram submetidos a análises de regressão realizadas por meio do aplicativo SigmaPlot, versão 9.01 da Jandel Scientific e, para comparações entre as regressões, foi utilizado o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Temperatura base

Os cinco casos de determinação de GDD apresentados por Ometto (1981) foram trabalhados matematicamente com auxílio do Software da Mathsoft Engineering & Education, Inc., Mathcad, version 12.0, para a determinação das equações de temperatura base.

Caso 1: $TB > TM > Tm > Tb$

$$Tb = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N_1 \cdot TM_1 + N_1 \cdot Tm_1 - N_2 \cdot TM_2 - N_2 \cdot Tm_2}{N_2 - N_1} \quad (68)$$

Caso 2: $TB > TM > Tb \geq Tm$

Neste caso, devem-se agrupar as Equações 69, 70, 71 e 72 para obter-se a equação de temperatura base inferior, que está representada na Equação 73.

$$A = N_2 \cdot TM_1 \cdot TM_2 - N_2 \cdot TM_2 \cdot Tm_1 \quad (69)$$

$$B = -N_1 \cdot TM_1 \cdot TM_2 + N_1 \cdot TM_1 \cdot Tm_2 \quad (70)$$

$$C = -N_2 \cdot N_1 \cdot (-TM_2 + Tm_2) \cdot (TM_1 - Tm_1) \cdot (TM_1 - TM_2)^2 \quad (71)$$

$$D = -N_1 \cdot TM_2 + N_1 \cdot Tm_2 + N_2 \cdot TM_1 - N_2 \cdot Tm_1 \quad (72)$$

$$Tb = \frac{A + B \pm \sqrt{C}}{D} \quad (73)$$

Verifica-se, pela Equação 73, que é possível obter dois valores de Tb. Foi considerado, para efeito de cálculo, o menor deles, desde que seja positivo.

Caso 03: TB>Tb>TM>Tm

Ocorre quando as temperaturas base inferior e base superior (Tb, TB) da planta forem acima da temperatura máxima do ar (TM). Neste caso, a energia à disposição da planta estará abaixo do valor mínimo necessário a ela e a energia acumulada, expressa em graus-dia, é, portanto, nula.

Caso 04: TM>TB>Tm>Tb

Neste caso, devem-se agrupar as Equações 74, 75, 76, 77, 78, 79 e 80 para se obter a equação de temperatura base inferior, que está representada na Equação 81.

$$A = N_1 \cdot Tm_1^2 \cdot TM_2 - N_1 \cdot Tm_1^2 \cdot Tm_2 \quad (74)$$

$$B = -2 \cdot N_1 \cdot TM_1 \cdot TB \cdot TM_2 + 2 \cdot N_1 \cdot TM_1 \cdot TB \cdot Tm_2 \quad (75)$$

$$C = N_1 \cdot TB^2 \cdot TM_2 - N_1 \cdot TB^2 \cdot Tm_2 \quad (76)$$

$$D = -N_2 \cdot Tm_2^2 \cdot TM_1 + N_2 \cdot Tm_2^2 \cdot Tm_1 \quad (77)$$

$$E = 2 \cdot N_2 \cdot TM_1 \cdot TB \cdot TM_2 - 2 \cdot N_2 \cdot TM_2 \cdot TB \cdot Tm_1 \quad (78)$$

$$F = -N_2 \cdot TB^2 \cdot TM_1 + N_2 \cdot TB^2 \cdot Tm_1 \quad (79)$$

$$G = (-TM_1 + Tm_1) \cdot (TM_2 - Tm_2) \cdot (N_1 - N_2) \quad (80)$$

$$Tb = \frac{1}{2} \cdot \frac{A + B + C + D + E + F}{G} \quad (81)$$

Uma vez conhecido o valor de Tb, basta usá-lo quando solicitado, nas Equações 82 a 91 que, agrupadas, fornecem o valor de TB representado na Equação 92.

$$A = N_2 \cdot TM_1 \cdot TM_2 - N_2 \cdot TM_2 \cdot Tm_1 \quad (82)$$

$$B = -N_1 \cdot TM_1 \cdot TM_2 + N_1 \cdot TM_1 \cdot Tm_2 \quad (83)$$

$$C = (-TM_1 + Tm_1) \cdot (-TM_2 + Tm_2) \quad (84)$$

$$D = N_1 \cdot Tm_2^2 \cdot N_2 - 2 \cdot Tm_2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot Tb - Tm_2 \cdot Tm_1 \cdot N_1^2 \quad (85)$$

$$E = -Tm_2 \cdot TM_1 \cdot N_1^2 + N_2^2 \cdot TM_1 \cdot Tm_2 - Tm_1 \cdot N_2^2 \cdot Tm_2 + 2 \cdot Tm_2 \cdot N_1^2 \cdot Tb \quad (86)$$

$$F = Tm_1 \cdot N_1^2 \cdot TM_2 - 2 \cdot N_2^2 \cdot TM_1 \cdot Tb - 2 \cdot N_1^2 \cdot TM_2 \cdot Tb \quad (87)$$

$$G = TM_1 \cdot N_1^2 \cdot TM_2 + Tm_1^2 \cdot N_2 \cdot N_1 - 2 \cdot Tm_1 \cdot N_2 \cdot N_1 \cdot Tb \quad (88)$$

$$H = 2 \cdot Tm_1 \cdot N_2^2 \cdot Tb + 2 \cdot N_1 \cdot TM_2 \cdot N_2 \cdot Tb + 2 \cdot N_2 \cdot TM_1 \cdot N_1 \cdot Tb \quad (89)$$

$$I = -2N_2 \cdot TM_1 \cdot N_1 \cdot TM_2 + N_2^2 \cdot TM_1 \cdot TM_2 - Tm_1 \cdot N_2^2 \cdot TM_2 \quad (90)$$

$$J = -N_1 \cdot TM_2 + N_1 Tm_2 + N_2 \cdot TM_1 - N_2 \cdot Tm_1 \quad (91)$$

$$TB = \frac{A + B \pm \sqrt{C \cdot (D + E + F + G + H + I)}}{J} \quad (92)$$

Verifica-se, pela Equação 92, que é possível obterem-se dois valores de TB. Foi considerado, para efeito de cálculo, o maior deles.

Caso 05: TM>TB>Tb>Tm

Neste caso, devem-se agrupar as Equações 93, 94, 95 e 96 para obter-se a equação de temperatura base inferior, que está representada na Equação 97.

$$A = 2 \cdot N_2 \cdot TM_2 \cdot Tm_1 - 2 \cdot N_2 \cdot TM_1 \cdot TM_2 + 2 \cdot N_1 \cdot TM_1 \cdot TM_2 \quad (93)$$

$$B = -2 \cdot N_1 \cdot TM_1 \cdot Tm_2 - N_1 \cdot TB \cdot TM_2 + N_1 \cdot TB \cdot Tm_2 \quad (94)$$

$$C = N_2 \cdot TB \cdot TM_1 - N_2 \cdot TB \cdot Tm_1 \quad (95)$$

$$D = N_1 \cdot TM_2 - N_1 \cdot Tm_2 - N_2 \cdot TM_1 + N_2 \cdot Tm_1 \quad (96)$$

$$Tb = \frac{A + B + C}{D} \quad (97)$$

Uma vez conhecido o valor de Tb, basta usá-lo quando solicitado, nas Equações 98 a 101 que, agrupadas, fornecem o valor de TB representado na Equação 102.

$$A = -N_1 \cdot Tb \cdot TM_2 + N_1 \cdot Tb \cdot Tm_2 + N_2 \cdot TM_1 \cdot Tb \quad (98)$$

$$B = -N_2 \cdot Tm_1 \cdot Tb - 2 \cdot N_2 \cdot TM_1 \cdot TM_2 + 2 \cdot N_2 \cdot TM_2 \cdot Tm_1 \quad (99)$$

$$C = 2 \cdot N_1 \cdot TM_1 \cdot TM_2 - 2 \cdot N_1 \cdot TM_1 \cdot Tm_2 \quad (100)$$

$$D = N_1 \cdot TM_2 - N_1 \cdot Tm_2 - N_2 \cdot TM_1 + N_2 \cdot Tm_1 \quad (101)$$

$$TB = \frac{(A + B + C)}{D} \quad (102)$$

As variáveis climáticas medidas na estação meteorológica automática, da rede de plataforma de coleta de dados PCD/INPE, na área experimental, durante o período de coleta de dados (19/mar/2003 a 26/set/2004), temperatura máxima e mínima, geraram a temperatura média diária. Estes valores foram usados na parametrização e no estudo dos modelos de determinação da temperatura base.

As temperaturas base inferior (Tb) encontradas foram de 12,9°C, pelo método apresentado por Ometto (1981), 14,8°C para os métodos do menor desvio padrão em dias (SDd), método do coeficiente regressão (Re) e coeficiente de variação em graus-dias (CVgd) e 15,4°C, pelo método do menor desvio

padrão em graus-dia (SDgd). A temperatura base superior (TB) foi determinada somente pelo método de Ometto (1981), tendo sido encontrado um valor de 32,4°C.

No que se refere à cultura do cafeeiro, não se conhecem muitos estudos para a determinação das temperaturas base inferior (Tb) e superior (TB). Entretanto, de acordo com Iaffe et al. (2001), a Tb para o café foi de 11°C para a região de Campinas, SP, e Coelho (2004) determinou um valor de 12,3°C para a região de Botucatu, SP, com altitude média de 807 m, semelhante à altitude de Lavras, MG. Os mesmos autores ainda determinaram um valor de 34°C para a temperatura base superior. Estes valores encontrados, independente do local de determinação, assim como condições climáticas, apresentaram grande semelhança aos valores obtidos por meio da metodologia de Ometto (1981), no que se refere aos limites inferior (12,9°C) e superior (32,4°C) de temperatura base.

Coelho (2004), na determinação do coeficiente de cultura para duas variedades de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) associado a graus-dia, adotou, baseado em revisão de literatura, valores de Tb e TB de, respectivamente, 13°C e 34°C, também semelhantes aos valores aqui determinados.

A temperatura base depende, além das condições experimentais (irrigação, eliminação de meristemas, período e/ou época de avaliação, estágio fisiológico das plantas, tipo de solo, dentre outros) dos métodos empregados em sua determinação, que interferem no valor exato da temperatura base. No entanto, a escolha do valor de Tb igual a 12,9°C e TB igual a 32,4°C, entre aqueles determinados neste trabalho, foi em função de um estudo associando coeficiente de cultura (Kc) a graus-dia de desenvolvimento (GDD), que será apresentado e discutido no item 4.7.

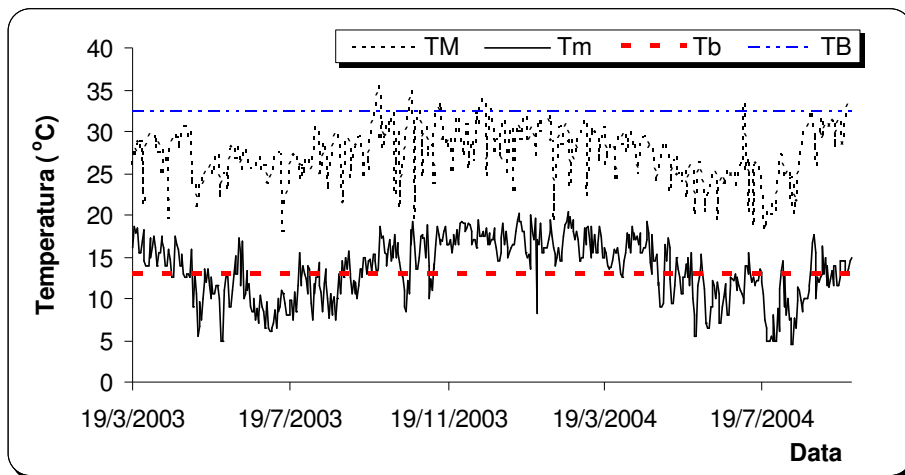


FIGURA 13 Temperaturas mínimas (Tm), máximas (TM), basal inferior (Tb=12,9°C) e basal superior (TB=32,4°C) verificadas durante o período de coleta de dados experimentais. Lavras, MG. 2006.

A variação das temperaturas máximas e mínimas durante o período em que se procedeu a condução deste trabalho está representada na Figura 13, tendo 4,5°C, observado em 11/ago/04 e 12/ago/04 e 35,5°C em 25/set/03, sido os valores mínimo e máximo, respectivamente, neste período. Observa-se também que, além destes valores extremos em algumas épocas do ano, a temperatura base superior foi superada e, nestas condições, a planta não se desenvolve ou se desenvolve a taxas bem reduzidas. Da mesma forma, no período do inverno, houve dias em que a temperatura mínima do ar esteve abaixo da temperatura base inferior, não havendo desenvolvimento vegetativo da cultura nestas condições. No entanto, entre agosto de 2003 e agosto de 2004, com raras exceções, as temperaturas mínimas e máximas do dia estiveram entre as basais inferior e superior. Isto proporcionou condições ideais para o desenvolvimento vegetativo, tendo, em setembro de 2004 surgido as primeiras floradas,

verificadas para as datas 1 e 2 ('Acaiá Cerrado' e 'Rubi') e data 5 ('Acaiá Cerrado') em 04/set/04; data 4 ('Acaiá Cerrado') em 07/set/04; data 3 ('Acaiá Cerrado' e 'Rubi') e datas 4 e 5 ('Rubi') em 26/set/04. Verifica-se, ainda, pela Figura 13, para estes períodos, que a temperatura máxima do dia oscilou em torno de 30°C, o que, segundo Matiello (1991), corresponde à temperatura ótima para o crescimento do cafeeiro jovem (até o primeiro ano de idade).

Independente da data de transplantio e cultivar, as primeiras floradas vieram praticamente na mesma época. Basta analisar as datas 1 e 5 de 'Acaiá Cerrado', transplantadas respectivamente em 19/mar/03 e 19/jul/03, que tiveram as primeiras floradas em 04/set/04. Para as mesmas datas, a cultivar Rubi teve floradas em 04/set/04 e 26/set/04. Isso mostra haver certa compensação nas atividades fisiológicas das plantas, quando as temperaturas mínimas e máximas do dia estão entre as basais inferior e superior, e a máxima do dia em torno da ótima. Esta análise, quando verificada na primavera-verão de 2003 e na segunda quinzena de julho de 2004, mostra uma aceleração no processo do desenvolvimento vegetativo, podendo explicar, assim, as diferentes durações do ciclo, em dias.

4.2 Graus-dia

Para o período de análise, determinou-se o acúmulo térmico de cada período, por meio de quatro metodologias: método Residual, método Ometto (1981), método Snyder e método Dufault (1997), considerando a temperatura base inferior e superior de 12,9°C e 32,4°C, respectivamente determinadas.

A Tabela 3 ilustra o acúmulo total de energia em graus-dia, (GDD), durante o período de transplantio até a primeira florada, para as cinco datas em estudo e os quatro métodos de determinação de graus-dia. No primeiro método de determinação de graus-dia, durante o ciclo do transplantio até a primeira

florada, o somatório térmico médio para as condições citadas foi de 3.663,23 graus-dia usando o método Residual; 3.735,55 graus-dia usando o método Ometto (1981); 3.700,66 graus-dia usando o método Snyder e 3.641,89 graus-dia usando o método Dufault (1997). Analisando-se a maior diferença em graus-dia entre as médias dos métodos em questão, verifica-se um valor de 93,66 graus-dia entre o método Dufault (1997) e Ometto (1981), correspondente a 2,6%, apenas.

TABELA 3 Acúmulo de energia, em graus dia, durante o período de transplântio até a primeira florada, para as duas cultivares em estudo. Lavras, MG. 2006.

Tb (°C)	Data	Métodos de determinação de GDD (°C)			
		Residual	Ometto	Snyder	Dufault
12,9	D1	3946,70	4042,72	3997,60	3924,87
	D2	3759,35	3843,41	3806,23	3737,59
	D3	3730,50	3808,07	3769,55	3708,74
	D4	3523,60	3580,64	3551,14	3502,92
	D5	3356,00	3402,89	3378,78	3335,32
Média		3663,23	3735,55	3700,66	3641,89

Verifica-se, também na Tabela 3, que, para cada data de transplântio, as constantes térmicas obtidas por meio de cada um dos métodos de determinação de graus-dia, mostraram também pequenas diferenças, tendo as maiores diferenças ocorrido sempre entre os métodos Dufault (1997) e Ometto (1981). As maiores diferenças foram de 1.17,85 graus-dia para data 1; 105,82 para data 2; 99,33 graus-dia para data 3; 77,72 graus-dia para as data 4 e 67,57 para data 5.

Assim como na escolha da temperatura base inferior, a escolha do método de determinação de graus-dia virá do estudo de K_c versus GDD apresentado no item 4.7, identificando o método apresentado por Ometto (1981) como o melhor para as duas cultivares.

Em comentários sobre o método apresentado por Ometto (1981), Varejão-Silva (2000) afirma que esta técnica só funcionaria a contento em áreas nas quais as médias das temperaturas máximas e mínimas (descendais ou mensais) não variassem significativamente de um ano para outro e cujos valores diários não oscilassem muito em torno do respectivo valor médio. Pode-se inferir, dessa forma, que o método de determinação de graus-dia, apresentado por Ometto (1981), representou a contento a constante térmica determinada com as temperaturas basais determinadas, ficando a ressalva de uma nova análise para o próximo ano.

4.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi feito sempre com o propósito de não deixar a camada de solo entre 0 e 40 cm de profundidade submetida a déficit hídrico. Para isso, dividiu-se este perfil em duas subcamadas de 20 cm; na primeira camada, monitorou-se o momento da irrigação e, na segunda camada, verificava-se a necessidade ou não de aplicar-se uma lâmina adicional para suprir a demanda hídrica das plantas até os 40 cm de profundidade.

Este procedimento manteve a umidade do solo sempre próxima à capacidade de campo, ficando entre valores equivalentes a um potencial matricial variável de -10 kPa e -20 kPa, (Figura 14). Com isso, foram garantidas as condições ideais de livre desenvolvimento vegetativo sem restrições hídricas para a determinação dos valores de evapotranspiração máxima da cultura a serem usados no cálculo dos coeficientes de cultura (K_c).

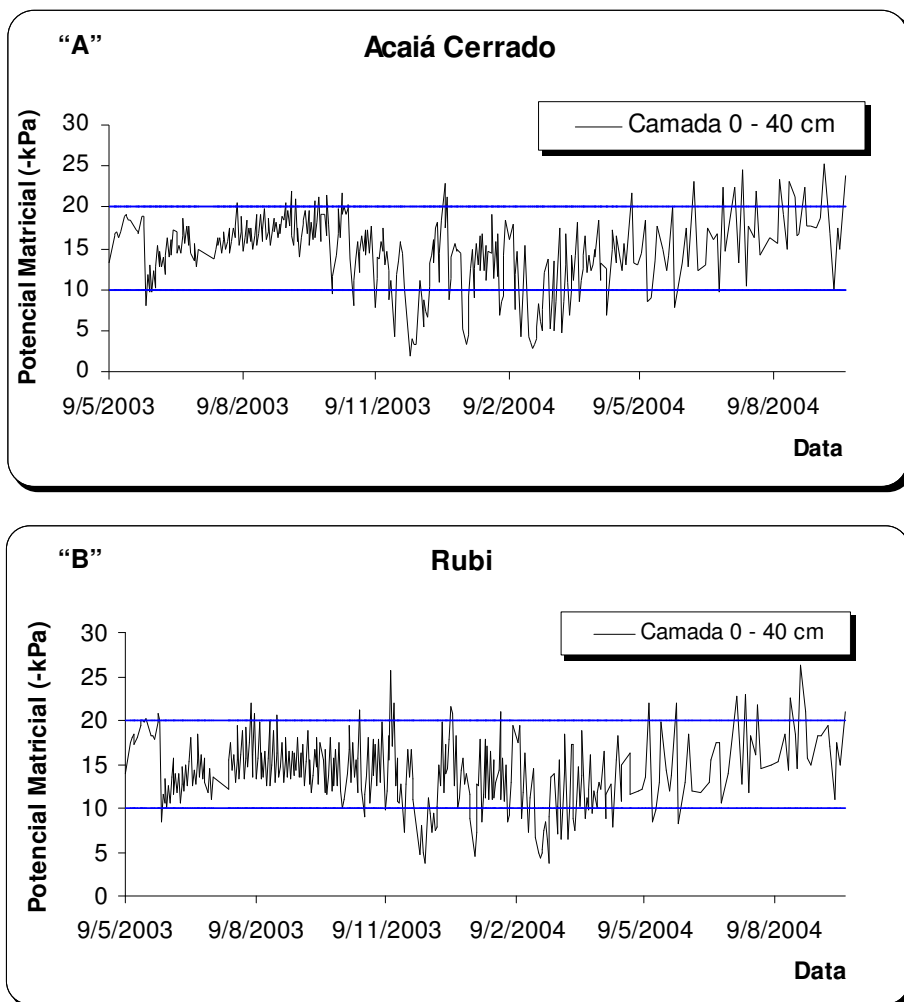


FIGURA 14 Variação do potencial matricial do solo com a cultivar Acaia Cerrado (A) e Rubi (B), na camada de 0 a 40 cm de profundidade, durante o período de irrigação e desenvolvimento vegetativo. Lavras, MG. 2006.

Os pontos em que a umidade do solo esteve alta, com o potencial matricial acima de -10 kPa, coincide com o período chuvoso, no qual as lâminas de precipitação foram superiores às necessárias para levar o solo à capacidade de campo. Houve situação em que a umidade do solo esteve baixa, com potenciais matriciais pouco abaixo de -20 kPa, entre duas irrigações sucessivas.

Com esta análise, pode-se afirmar que o objetivo de manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo, durante o período necessário para determinação do coeficiente de cultura para ambas as cultivares, foi atingido de forma satisfatória.

4.3.1 Calibração do Profile Probe

A Tabela 4 mostra o resultado do cálculo utilizado para calibração do Profile Probe. Os parâmetros de calibração a_0 , -12,5 e a_1 , 50, que representam as propriedades dielétricas do solo em estudo, foram obtidos quando a soma de quadrados dos erros entre as umidades gravimétricas e as obtidas pelo Profile Probe foi de 0,0032.

TABELA 4 Processo de calibração do Profile Probe, utilizando a rotina Solver do Excel para a obtenção dos parâmetros de calibração a_0 e a_1 por meio da minimização do erro entre as umidades gravimétricas (θ_{grav}) e as obtidas pelo Profile Probe (θ_{calib}). Lavras, MG. 2006.

Parâmetros de calibração		Valores				
a_0		-12,5000				
a_1		50,0000				
$\sum (\theta_{grav} - \theta_{calib})^2$		0,00320				
Processo de calibração						
Camada	$\theta_{gravimetrica}$	$\theta_{profile\ probe}$	Tensão (V)	$\sqrt{\epsilon}$	$\theta_{calibrado}$	$(\theta_{grav} - \theta_{calib})^2$
10	0,270	0,250	0,193	2,682	0,304	1,1616E-03
20	0,320	0,282	0,216	2,923	0,308	1,4168E-04
30	0,327	0,287	0,218	2,945	0,309	3,3698E-04
40	0,333	0,215	0,170	2,454	0,299	1,1483E-03
60	0,336	0,335	0,249	3,302	0,316	4,1105E-04

Verifica-se, pela Figura 15, que a curva de calibração apresenta valor de umidade superior à gravimétrica somente na camada de 0 a 20 cm, sensor do Profile Probe a 10 cm de profundidade. Esta umidade, assim como as outras, é obtida por meio dos parâmetros de calibração do Profile Probe, que convertem, em umidade, os sinais voltaicos emitidos pelo equipamento sob certas condições de propriedades dielétricas do solo, ou índice refrativo.

Observa-se, na coleta de dados para a calibração do Profile Probe, que os parâmetros a_0 e a_1 utilizados não representaram muito bem, a 40 cm, a umidade gravimétrica. Nota-se que, na amostragem, os valores gravimétricos foram crescentes de acordo com o aumento na profundidade de coleta e, paralelamente a estas condições, o Profile Probe mostrou-se descalibrado.

Verifica-se, ainda pelos dados da Tabela 4, que, nas colunas de tensão e umidade calibrada, quando foram obtidos os parâmetros de calibração corretos, houve certa coerência nos dados, mostrando que quanto maior o sinal voltaico

emitido pelo Profile Probe mais úmido está o solo (umidade calibrada). Dessa forma, verifica-se a viabilidade do processo de calibração utilizado em relação à recomendação do fabricante em usar o ThetaProbe com base de calibração.

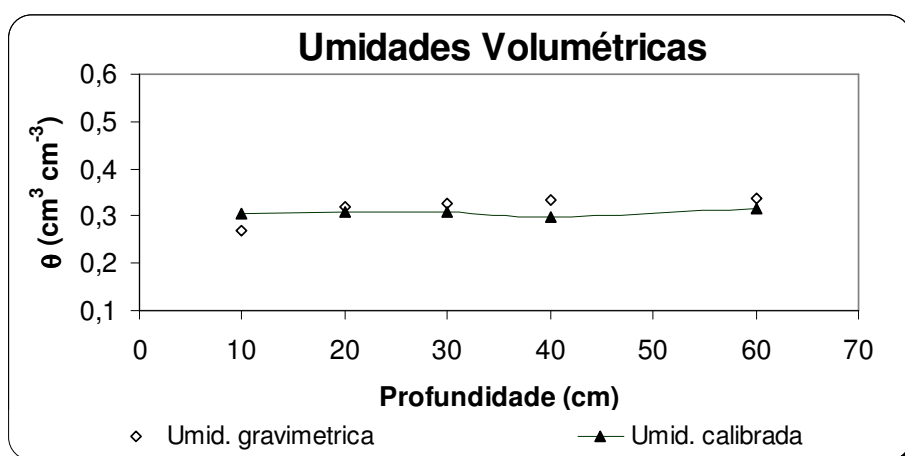


FIGURA 15 Curva de calibração do Profile Probe obtida por meio de comparações entre as umidades gravimétricas e as obtidas pelo Profile Probe, usando a rotina Solver do Excel para um Latossolo Vermelho Distroférrico Típico, em Lavras, MG. 2006.

4.3.2 Uniformidade de aplicação de água

O resultado do teste de uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação é mostrado na Figura 16. Os resultados médios são provenientes de cinco tratamentos com quatro gotejadores em cada uma das cinco linhas de irrigação por tratamento e duas repetições por cultivar.

Verifica-se que as vazões médias dos emissores estão bem próximas à vazão média fornecida pelo fabricante, $1,6 \text{ L h}^{-1}$, demonstrando uma boa performance do sistema de irrigação. Isso pode ser verificado pelo coeficiente de

variação total, CVt, de 0,05, encontrado com o teste, que, segundo tabela citada por Cabello (1996), é classificado como excelente.

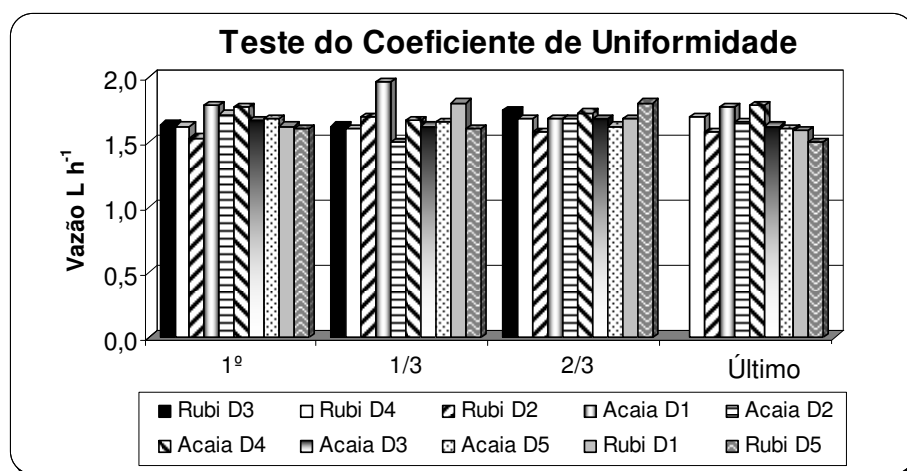


FIGURA 16 Representação gráfica do teste de uniformidade de aplicação de água do sistema de irrigação na área experimental, com emissores localizados no início, a 1/3, 2/3 e fim da linha lateral. Lavras, MG. 2006.

4.4 Evapotranspiração do cultivo de referência (ET_o)

A determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) foi realizada com a equação de Penman-Monteith-FAO, com o propósito de ter um dos parâmetros necessários a determinação do coeficiente de cultura (K_c).

Observando-se os dados de umidade relativa média do ar no período de coleta e análise dos dados, na Tabela 5, referentes aos meses de março de 2003 a setembro de 2004, verifica-se que o seu valor médio decresce de 89% a 68%, no

outono/inverno de 2003. Neste período de coleta de dados, têm-se as menores temperaturas, velocidades do vento e valores de ETo.

TABELA 5 Variáveis climáticas coletadas pela estação meteorológica do CPTEC/INPE junto à área experimental e valores de ETo pela equação Penman-Monteith FAO, entre 2003 e 2004. Lavras, MG.

Mês	Chuva mm	Tmax °C	Tmin °C	Tmed °C	UR %	V _{Vento} m s ⁻¹	Rs MJ m ⁻²	Eto mm d ⁻¹
mar/03	164,3	28,1	15,4	21,8	89	1,55	16,68	3,25
abr/03	17,3	28,7	14,4	21,6	80	1,36	16,92	3,29
mai/03	41,8	25,2	9,9	17,5	78	1,42	15,28	2,53
jun/03	0,0	26,6	9,9	18,2	72	1,15	15,27	2,48
jul/03	12,3	24,9	8,7	16,8	68	1,38	14,64	2,55
ago/03	2,3	26,8	10,1	18,4	68	1,63	16,25	3,12
set/03	5,4	29,3	12,8	21,1	71	1,79	18,36	4,06
out/03	30,1	30,1	13,9	22,0	72	1,74	19,88	4,42
nov/03	51,9	29,6	15,2	22,4	79	1,70	17,99	4,06
dez/03	176,1	30,2	16,8	23,5	85	1,69	19,55	4,15
jan/04	139,1	29,5	16,2	22,9	86	1,63	18,60	4,01
fev/04	118,4	28,9	16,5	22,7	86	1,48	17,12	3,58
mar/04	81,7	27,1	14,1	20,6	83	1,44	16,82	3,85
abr/04	40,5	27,9	15,0	21,4	85	1,32	14,61	3,04
mai/04	29,1	25,3	11,3	18,3	85	1,31	13,00	2,28
jun/04	33,0	24,4	9,6	17,0	83	1,31	12,78	2,08
jul/04	10,9	23,6	8,9	16,2	80	1,45	13,70	2,26
ago/04	0,2	27,0	9,2	18,1	68	1,54	18,74	3,46
set/04	16,6	31,4	12,6	22,0	77	1,54	21,88	4,36

A temperatura média variou de 16,8°C a 21,8°C, com baixa contribuição para o processo de evapotranspiração. Porém, como a média de março a dezembro de 2003 ficou em 20,3°C, dentro do intervalo médio anual de 18°C e 22°C, citado por Clarke & Macrae (1985), Matiello (1991) e Pedini (2000) como limites ideais para o desenvolvimento do (*Coffea Arábica* L.), verificam-se condições favoráveis de temperatura para o desenvolvimento fisiológico do cafeeiro.

Com relação à radiação solar global, ocorreram variações entre 16,92 a 14,64 MJ m⁻² d⁻¹, do final da estação chuvosa para o início da estação seca, sendo os valores mais baixos correspondentes aos meses de junho e julho de 2003, durante o outono/inverno. No entanto, no começo do inverno de 2003, observa-se certa elevação nos valores destes parâmetros até aqui discutidos. Isso reflete em um aumento da ETo, que atinge o seu máximo, 4,42 mm d⁻¹, em outubro, no início da primavera. Neste ponto, permanecem praticamente estáveis os valores de temperatura máxima, em torno de 30°C, mínima em torno de 19°C e radiação solar global em torno de 16 MJ m⁻² d⁻¹. Nessa ocasião verificaram-se baixos índices pluviométricos, em torno de 70 a 160 mm mensais, entre agosto e setembro de 2003 que, associados às maiores manifestações da velocidade do vento, 1,79 m s⁻¹, em setembro de 2003, justificam o aumento da ETo.

Verificou-se que, de janeiro a setembro de 2004, a temperatura média do ar foi de 19,9°C, que, também segundo Clarke & Macrae (1985), Matiello (1991) e Pedini (2000), está dentro do limite ótimo para o desenvolvimento do cafeeiro arábica. Dessa forma, suprindo-se as demandas hídricas e nutricionais das cultivares estudadas, estas têm condições de desenvolvimento satisfatório.

Pela Figura 17 observa-se a variação da evapotranspiração de referência para os 19 meses de coleta de dados, entre 2003 e 2004, por meio de representação gráfica dos valores mensais gerados a partir dos valores diários neste período.

Considerando-se todo o período analisado, a evapotranspiração média diária, nas estações de outono, inverno e primavera de 2003 foi de 2,77 mm, 3,24 mm e 4,21 mm, respectivamente. Nas estações de verão, outono e inverno de 2004, foram de 3,81, 2,47 e 3,36 mm, respectivamente. A máxima evapotranspiração, como já citado, 4,42 mm, ocorreu no mês de outubro, na primavera de 2003; a mínima, 2,08 mm, ocorreu no mês de junho de 2004, no outono-inverno.

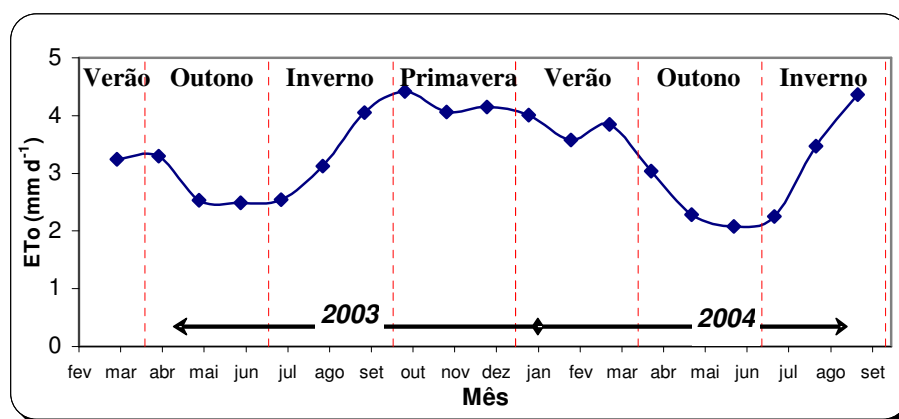


FIGURA 17 Variação mensal da evapotranspiração (ETo) obtida pela equação de Penman-Monteith-FAO, nos anos de 2003 e 2004, em Lavras, MG.

As variações de umidade relativa média do ar e da velocidade média do vento, nos anos de 2003 e 2004, são apresentadas na Figura 18. A partir de junho de 2003, observa-se uma variação inversa em relação aos elementos meteorológicos. Nota-se que o período de maior umidade relativa média do ar é justamente durante a estação chuvosa de 2004, período em que ocorrem as menores velocidades médias do vento.

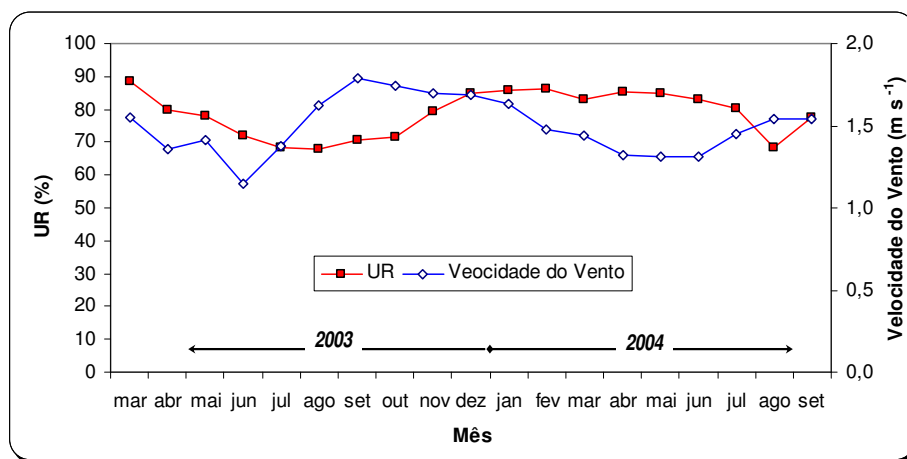


FIGURA 18 Variação mensal da umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento, no período de 2003 a 2004, em Lavras, MG.

A variação dos valores médios mensais de temperatura máxima e mínima e radiação solar global, durante os anos de 2003 e 2004, encontra-se na Figura 19. Pode-se observar que, no período analisado, entre março e junho de 2003, em relação ao mesmo período em 2004, as temperaturas máxima e mínima variaram pouco, enquanto que, para a radiação solar, houve uma redução nos valores médios durante a época chuvosa, que vai de março a junho, nos dois anos. Verificaram-se, para a radiação solar, valores de 16,68 a 15,27 MJ m⁻² d⁻¹, março e junho de 2003, respectivamente e 16,82 a 12,78 MJ m⁻² d⁻¹, março e junho de 2004, respectivamente. Conforme relatado por Matzenouer et al. (1998), decréscimo no valor de radiação solar, que é a fonte de energia utilizada no processo de evapotranspiração, provoca redução na demanda evaporativa.

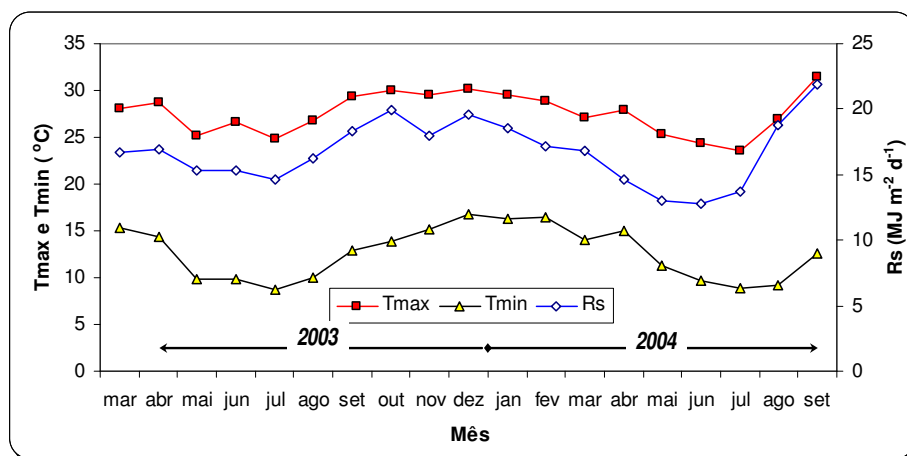


FIGURA 19 Variação mensal de temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar e de radiação solar global (Rs), nos anos de 2003 e 2004 em Lavras, MG.

4.5 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A determinação da evapotranspiração da cultura foi realizada conforme metodologia descrita, com monitoramento feito de 19/mar/2003 a 26/set/2004, porém, os dados médios dos componentes do balanço hídrico apresentados na Tabela 6 iniciam-se em 13/maio/2003. Isso se deve à não realização do balanço hídrico nos dias em que ocorreram precipitações pluviométricas, componente este que poderia promover escoamento superficial.

Outro ponto que deve ser considerado no processo de cálculo da ETc é que, na ausência de irrigação, se a variação de armazenamento e fluxo, somados, apresentarem valores negativos, nestas circunstâncias, a ETc também assim será.

Cada componente da Tabela 6 representa a média mensal dos dados acumulados ao longo de cada mês, considerando as cinco datas de transplante.

TABELA 6 Componentes médios do balanço hídrico do solo com dados das cultivares Acaíá Cerrado e Rubi, entre 19/mar/03 e 26/set/04. Lavras, MG.

Mês	'Acaíá Cerrado'				'Rubi'			
	I	ΔA	D	ETc	I	ΔA	D	ETc
	mm	mm	mm d ⁻¹	mm d ⁻¹	mm	mm	Mm d ⁻¹	mm d ⁻¹
mai/03	1,33	-0,15	0,02	1,51	1,46	-0,32	0,02	1,71
jun/03	0,25	-1,57	0,01	1,85	0,31	-1,92	0,00	2,40
jul/03	0,05	-1,70	0,00	1,83	0,00	-2,84	0,00	2,90
ago/03	0,12	-0,27	0,00	0,70	0,06	-0,75	-0,01	1,35
set/03	0,11	-0,55	0,00	0,96	0,09	-0,72	-0,01	1,97
out/03	0,33	-0,42	0,00	1,07	0,25	-0,76	-0,01	2,28
nov/03	0,17	-0,55	-0,01	1,06	0,09	-0,73	-0,01	1,86
dez/03	0,59	-1,10	0,00	2,16	0,49	-0,59	-0,01	1,06
jan/04	0,14	-0,58	-0,01	1,23	0,24	-0,79	-0,02	1,98
fev/04	0,00	-0,19	0,00	0,19	0,17	-0,48	-0,03	0,62
mar/04	0,34	-1,11	0,02	1,47	0,18	-1,05	-0,03	1,21
abr/04	0,00	-0,39	0,00	0,71	0,20	-0,41	-0,01	1,32
mai/04	0,94	-0,23	0,03	1,36	1,02	-0,22	-0,01	1,23
jun/04	0,23	-0,78	0,00	1,11	0,00	-0,80	-0,01	0,79
jul/04	0,70	-1,09	0,00	1,79	0,61	-0,84	-0,01	1,35
ago/04	1,31	-0,89	0,00	1,90	0,79	-1,00	0,00	1,78
set/04	1,61	-1,18	0,00	3,10	1,29	-0,37	-0,01	2,18

I: irrigação; ΔA : variação de armazenamento; D: drenagem e ETc: evapotranspiração da cultura.

Verifica-se, nesta tabela, uma maior evapotranspiração da cultivar Rubi na fase inicial de seu desenvolvimento, em relação à cultivar Acaíá Cerrado.

A partir de maio de 2004, os valores de ETc para a cultivar Acaíá Cerrado superaram os valores verificados para a cultivar Rubi (Figura 20A), até o início das primeiras floradas que se manifestaram em setembro, ocasião em que se verificaram valores de 3,10 mm d⁻¹ para a cultivar Acaíá Cerrado e 2,18 mm d⁻¹ para a 'Rubi'. Este período é precedido pelas maiores concentrações de

chuvas, out/2003 a jun/2004 (Figura 20B), quando se verifica uma redução drástica da ETC, que só voltou a elevar-se novamente de jun/2004 em diante.

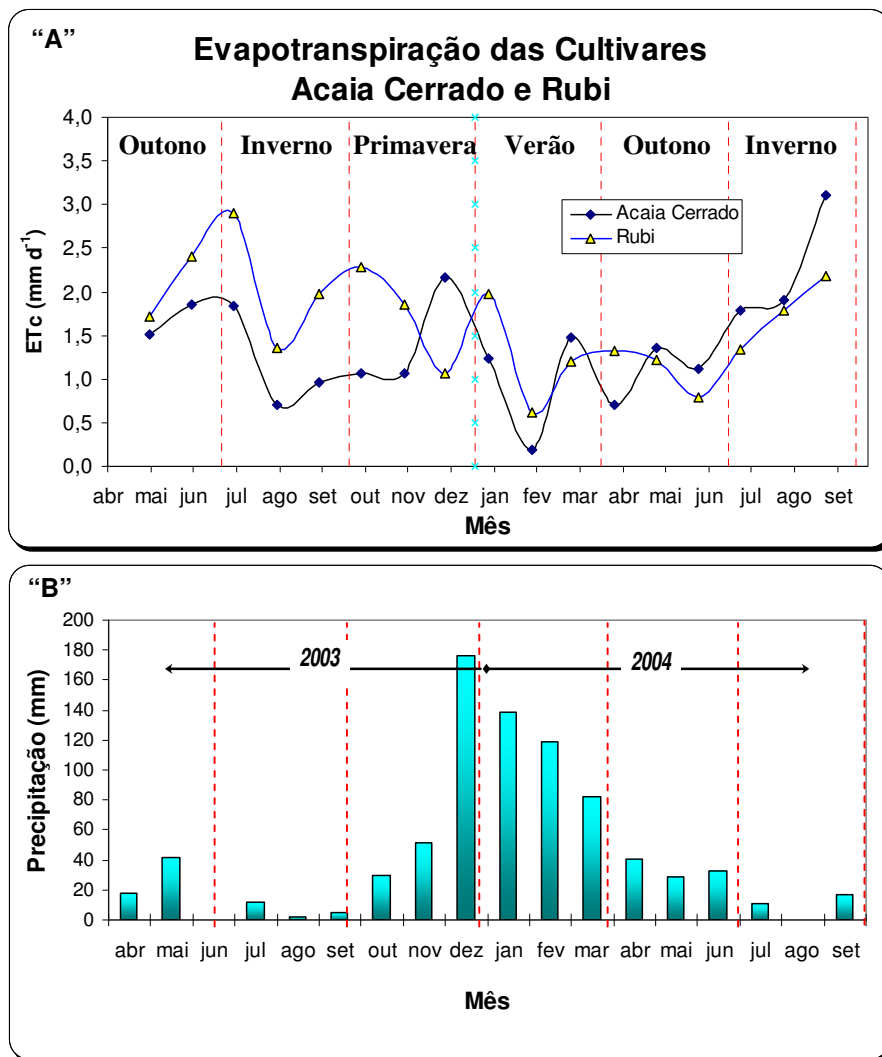


FIGURA 20 Evapotranspiração do cafeeiro arábica, cultivares Acaia Cerrado e Rubi, entre 2003 e 2004 (A) e precipitação pluviométrica no mesmo período (B), em Lavras, MG. 2006.

As evapotranspirações médias, considerando-se todo o período analisado (17 meses), para a cultivar Acaia Cerrado, no outono, inverno e primavera de 2003 foram de 1,68, 1,16 e 1,43 mm d⁻¹, respectivamente. No verão, outono e inverno de 2004 foram de 0,96, 1,06 e 2,26 m d⁻¹, respectivamente.

Para a cultivar Rubi, no outono, inverno e primavera de 2003, foram de 2,06, 2,07 e 1,73 mm d⁻¹, respectivamente e, no verão, outono e inverno de 2004, foram de 1,27, 1,11 e 1,77 mm d⁻¹, respectivamente.

Verificou-se, por ocasião das maiores temperaturas, em torno de 30°C na primavera de 2003 e 27°C em mar/2004, que a ETc para a cultivar Acaia Cerrado foi de 1,43 mm d⁻¹ na primavera e 1,47 mm d⁻¹ em março, ficando próximo de 1,45 mm d⁻¹, valor encontrado por Antunes et al. (2000) em Viçosa, MG, no período mais quente, com duas cultivares de cafeeiro arábica irrigados e em formação. Os mesmos autores verificaram, para o período mais frio, 1,05 mm d⁻¹, o que está próximo dos valores encontrados no inverno de 2003 (1,16 mm d⁻¹) e outono de 2004 (1,06 mm d⁻¹), quando as temperaturas mínimas estiveram baixas. Para a cultivar Rubi, o valor que mais se aproxima dos verificados por estes autores refere-se ao outono de 2004, quando encontrou-se um valor de 1,11 mm d⁻¹.

O maior valor médio de ETc verificado, 2,26 mm d⁻¹, ocorreu no período de floração, inverno de 2004. Este valor aproxima-se do encontrado por Neto et al. (2001) para café arábica em produção na fase de maturação de frutos (2,17 mm d⁻¹) que, assim como para o período de floração, a maturação exige uma maior demanda hídrica, resultando em valores mais elevados de ETc.

4.6 Coeficiente de cultura (Kc)

Os coeficientes de cultura foram determinados por meio da relação entre os valores de evapotranspiração da cultura (ETc) e os correspondentes valores de evapotranspiração do cultivo de referência (ETo).

Verifica-se, pelos dados da Tabela 7, os valores médios de Kc para as cultivares Acaia Cerrado e Rubi. Estes valores foram obtidos pelas médias diárias das cinco datas de transplântio por cultivar, dentro de intervalos distintos de 400 GDD a partir do primeiro transplântio (data 1). O uso de intervalos de 400 GDD deve-se ao fato de este valor ser o que conseguiu agrupar o maior número de Kc para o seu cálculo médio.

Os métodos de determinação de GDD, residual, de Dufault (1997), Ometto (1981) e de Snyder (1985) foram testados utilizando-se os valores determinados de Tb (12,9°C, 14,8°C e 15,4°C) e TB (32,4°C), proporcionando valores distintos de constantes térmicas para uma mesma data de transplântio. Com isso, obtiveram-se valores diferentes de Kc para cada intervalo de 400 GDD, de acordo com os diferentes métodos de determinação de graus-dia, embora para uma mesma Tb, alguns intervalos de GDD tenham apresentado valores iguais para Kc.

Estas variáveis aqui mencionadas foram submetidas, na seqüência, a um estudo de regressão de onde é indicado o melhor ajuste de Kc em função de GDD.

TABELA 7 Valores médios de coeficiente de cultura (Kc), em função de intervalos de 400 graus-dia de desenvolvimento (GDD) e temperaturas base, para as cultivares Acaia Cerrado e Rubi, no período de março/2003 a setembro/2004, nas condições climáticas de Lavras, MG.

Valores de Kc x GDD para a cultivar Acaia Cerrado													
GDD intervalo	GDD médio	Método de determinação de GDD											
		Residual			Ometto			Snyder			Dufault		
		12,9	14,8	15,4	12,9	14,8	15,4	12,9	14,8	15,4	12,9	14,8	15,4
0 - 400	200	0,16	0,42	0,41	0,16	0,54	0,43	0,16	0,52	0,41	0,16	0,42	0,41
400 - 800	600	0,33	0,30	0,27	0,33	0,31	0,29	0,33	0,31	0,30	0,33	0,30	0,27
800-1200	1000	0,25	0,24	0,30	0,28	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24	0,25	0,24	0,29
1200-1600	1400	0,28	0,28	0,29	0,25	0,31	0,26	0,28	0,32	0,26	0,28	0,27	0,30
1600-2000	1800	0,29	0,37	0,44	0,29	0,33	0,40	0,27	0,33	0,40	0,32	0,39	0,44
1600-2400	2200	0,30	0,51	0,58	0,33	0,42	0,51	0,34	0,44	0,52	0,30	0,50	0,62
2400-2800	2600	0,40	0,68	0,66	0,40	0,64	0,69	0,40	0,63	0,67	0,39	0,70	0,62
2800-3200	3000	0,51	0,50		0,52	0,66	0,59	0,50	0,71	0,59	0,54	0,45	
3200-3600	3400	0,66			0,61			0,64			0,66		
3600-4000	3800	0,70			0,67			0,74			0,68		
4000-4400	4200				0,83								

Valores de Kc x GDD para a cultivar Rubi													
GDD intervalo	GDD médio	Método de determinação de GDD											
		Residual			Ometto			Snyder			Dufault		
		12,9	14,8	15,4	12,9	14,8	15,4	12,9	14,8	15,4	12,9	14,8	15,4
0 - 400	200	0,18	0,45	0,48	0,18	0,52	0,45	0,28	0,40	0,45	0,18	0,45	0,48
400 - 800	600	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44
800-1200	1000	0,38	0,42	0,39	0,38	0,41	0,42	0,38	0,40	0,42	0,38	0,42	0,39
1200-1600	1400	0,42	0,38	0,27	0,42	0,39	0,37	0,42	0,40	0,37	0,42	0,37	0,44
1600-2000	1800	0,39	0,50	0,57	0,34	0,47	0,52	0,34	0,47	0,51	0,40	0,52	0,59
1600-2400	2200	0,44	0,58	0,54	0,30	0,46	0,55	0,47	0,49	0,56	0,44	0,58	0,57
2400-2800	2600	0,58	0,50	0,46	0,53	0,58	0,49	0,55	0,55	0,47	0,58	0,52	0,39
2800-3200	3000	0,59			0,61	0,38		0,61	0,40		0,59		
3200-3600	3400	0,54			0,54			0,52			0,54		
3600-4000	3800	0,37			0,47			0,43			0,37		

4.7 Coeficiente de cultura, em função de graus-dia

Ao se fazer uso do software ‘SigmaPlot v.9.01’ para ajustar o coeficiente de cultura (Kc) em função de graus-dia de desenvolvimento (GDD), foram obtidos valores de coeficientes de determinação (r^2) superiores àqueles apresentados no Tabela 8. No entanto, algumas curvas originadas desses ajustes, Figuras 21 e 22, não representam bem a curva de Kc, razão pela qual foram descartadas, agrupando somente aqueles ajustes cujas curvas mais se assemelham à curva de Kc.

TABELA 8 Parâmetros da equação de regressão polinomial de 3º grau, de Kc vs GDD, determinados em diferentes datas de transplântio de café arábica, cultivares Acaia Cerrado e Rubi, de acordo com quatro métodos de determinação de graus-dia. Lavras, MG. 2006.

Tb	Parâm.	Residual	Ometto	Snyder	Dufault
Acaia Cerrado					
12,9	y_0	0,1880	0,2049	0,1777	0,1957
	a	1,1395e-4	5,8383e-5	1,5190e-4	8,4034e-5
	b	-5,5205e-8	-1,5345e-8	-8,3621e-8	-3,0746e-8
	c	1,6752e-11	8,8612e-12	2,2322e-11	1,1992e-11
	r^2	0,93 ^{**}	0,96 ^{**}	0,95 ^{**}	0,92 ^{**}
Rubi					
12,9	y_0	0,2405	0,2442	0,3645	0,2399
	a	7,2380e-5	1,1408e-4	-1,1498e-4	7,3356e-5
	b	6,5406e-8	-5,8033e-9	1,3885e-7	6,5532e-8
	c	-1,8977e-11	-1,2516e-12	-2,6953e-11	-1,9075e-11
	r^2	0,67 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,68 ^{ns}

^{**} Significativo a 1% e ns quando não significativo.

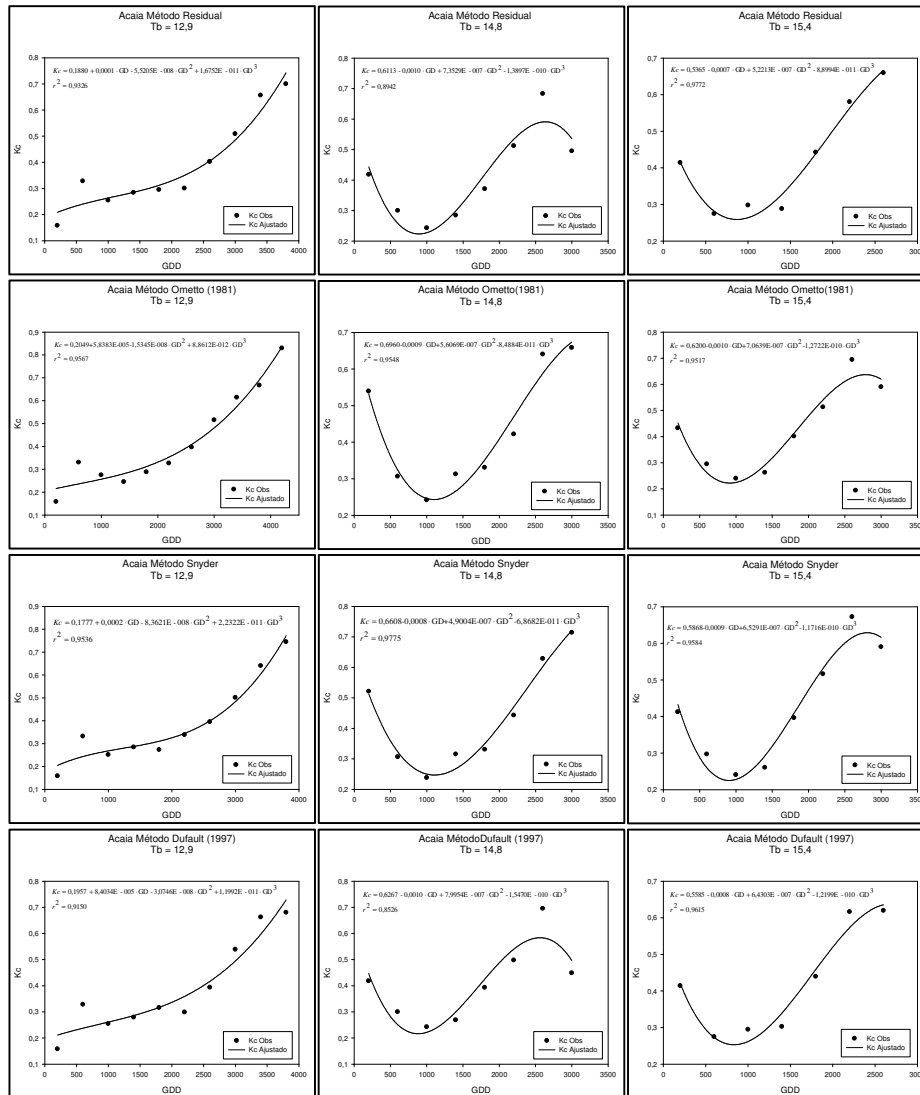


FIGURA 21 Curvas de Kc observadas, e ajustadas em função de GDD, para a cultivar Acaia Cerrado, usando o método de determinação de GDD residual, Ometto (1981), Snyder, e Dufault (1997) com Tb (12,9°C, 14,8°C e 15,4°C) e TB (32,4°C), nas condições climáticas de Lavras, MG, 2006.

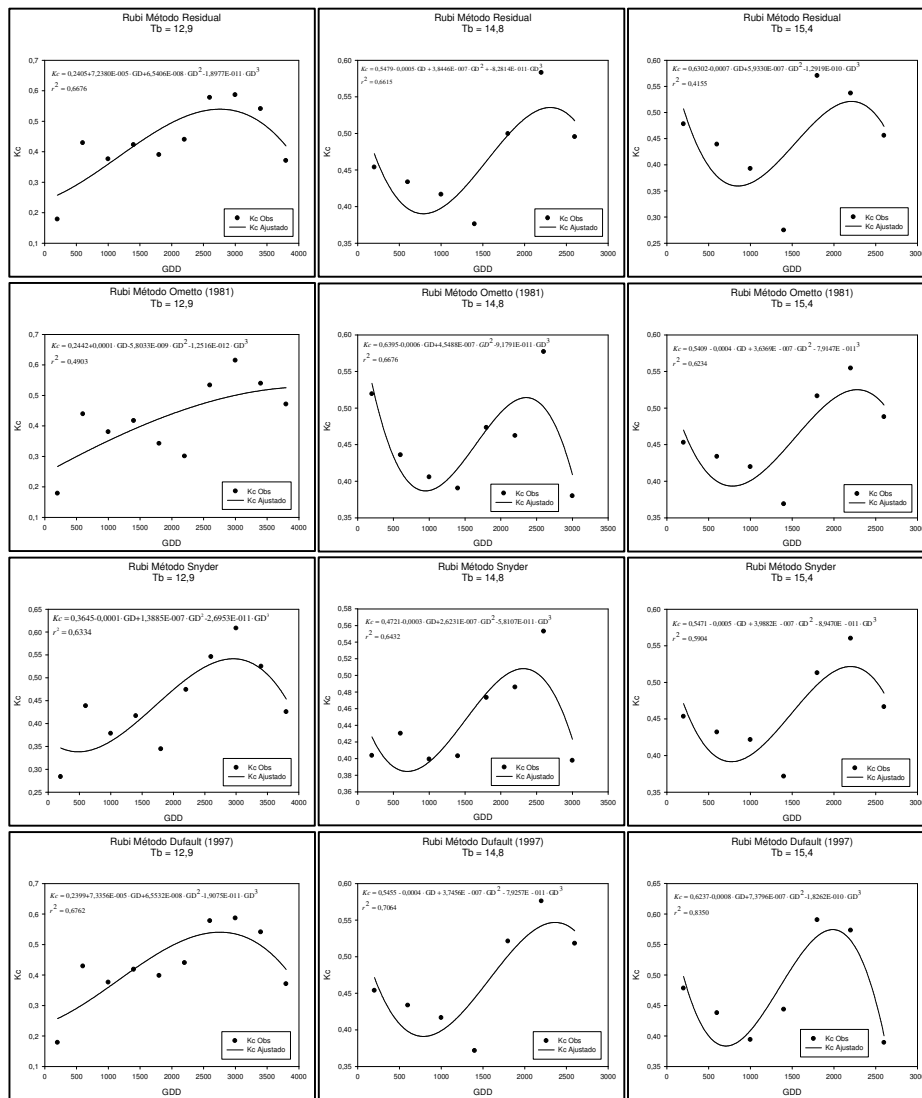


FIGURA 22 Curvas de Kc observadas e ajustadas em função de GDD, para a cultivar Rubi, utilizando-se o método de determinação de GDD residual, Ometto (1981), Snyder, e Dufault (1997) com Tb (12,9°C, 14,8°C e 15,4°C) e TB (32,4°C), nas condições climáticas de Lavras, MG, 2006.

Para as cultivares Acaiá Cerrado e Rubi, Figuras 21 e 22, verifica-se que as curvas de K_c , em função de GDD obtidas com a T_b de 14,8°C e 15,4°C apresentam, em seu início, valores decrescentes de K_c , inviabilizando estes valores de temperaturas base no cálculo de graus-dia.

Como resultado desta análise, observam-se, na Tabela 8, apenas os coeficientes de regressão das equações polinomiais de terceiro grau, Equação 103, usando no cálculo de GDD a T_b de 12,9°C, que proporcionou os melhores resultados dentre todos os tratamentos.

$$Kc = y_0 + a \cdot GD + b \cdot GD^2 + c \cdot GD^3 \quad (103)$$

em que:

K_c : coeficiente de cultura;

y_0 , a , b e c : parâmetros de regressão polinomial

Para a cultivar Acaiá Cerrado, todos os modelos de determinação de graus-dia foram altamente significativos, com r^2 variando de 0,92 a 0,96. No entanto, para a cultivar Rubi, os mesmos modelos de determinação de graus-dia não foram significativos e os r^2 variaram de 0,49 a 0,68, mostrando uma melhor resposta de K_c em função de GDD, para a cultivar Acaiá Cerrado. A não significância verificada para cultivar Rubi, provavelmente, está associada à discrepância do valor entre a temperatura base fisiológica e a estatisticamente obtida, usada no cálculo de graus-dia que, segundo Arnold (1959), pode ocorrer devido à influência de alguns outros fatores ambientais, como luz ou umidade, os quais influenciam a taxa de desenvolvimento e estariam correlacionados com a temperatura. Como a umidade foi controlada, restam altas intensidades luminosas que saturam intensamente o aparelho fotossintético do cafeeiro, acarretando fotoinibição (Nunes et al., 1993).

Analisando-se as equações de regressão de Kc versus GDD após linearização, utilizando-se o procedimento de Snedecor & Cochran (1989), obtidas para as diferentes cultivares, datas de transplântio e métodos de determinação de GDD, conclui-se que os sistemas não se diferenciaram estatisticamente. Pode-se, então, inferir que o Kc, em função de GDD, não mostrou diferenças para os dados associados de ambas as cultivares quando obtidos para cada método de determinação de GDD.

Devido à não significância verificada por meio do procedimento de Snedecor & Cochran (1989), os valores de Kc e GDD foram agrupados, resultando em novas equações, Tabela 9, e novas curvas, Figura 23. Nesta análise, todos os métodos de determinação de GDD foram altamente significativos, porém, quando os valores de r^2 são comparados com os r^2 da Tabela 8, verifica-se uma redução destes coeficientes de determinação. Como o propósito é encontrar uma única equação que atenda a ambas as cultivares, a análise apresentada a seguir leva em consideração as novas equações obtidas.

Esse resultado decorre do fato de os Kc para as cultivares Acaiá Cerrado e Rubi não terem sofrido ação de GDD, não ocorrendo modificações nos cálculos de GDD que provocassem diferenciação de Kc entre as cultivares.

Os valores reduzidos de r^2 verificados no Tabela 9, devem-se à amplitude dos valores de Kc obtidos nos ajustes para a cultivar Rubi (Figura 23).

Por se tratar de duas cultivares com estruturas diferentes e o Kc ser um indicador de grande significado físico e biológico, estes resultados podem ser explicados segundo Allen et al. (1994), Arruda et al. (2000) e Wright (1982), quando afirmam que os valores de Kc dependem da área foliar, arquitetura da planta (parte aérea e sistema radicular), cobertura vegetal e superfície transpirante.

TABELA 9 Parâmetros da equação de regressão polinomial de 3º grau, de kc vs GDD determinados por meio do agrupamento dos dados das cultivares Acaia Cerrado e Rubi, de acordo com quatro métodos de determinação de graus-dia. Lavras, MG. 2006.

Tb	Parâm.	Residual	Ometto	Snyder	Dufault
‘Acaia Cerrado’ + ‘Rubi’					
	y_o	0,2143	0,1986	0,2711	0,2178
	a	9,3164e-5	1,7469e-4	1,8460e-5	7,8695e-5
12,9°C	b	5,1004e-9	-7,3098e-8	2,7614e-8	1,7393e-8
	c	-1,1124e-12	1,5383e-11	-2,3152e-12	-3,5418e-12
	r²	0,59**	0,75**	0,61**	0,60**

** Altamente significativo a 1%.

Nesta análise, todos os métodos de determinação de GDD foram altamente significativos, porém, o que melhor ajustou Kc a valores de GDD, foi Ometto (1981), Figura 23B, proporcionando um r² de 0,75.

Dessa forma, serão indicadas, para ambas as cultivares, as temperaturas base inferior e superior 12,9°C e 32,4°C, respectivamente, bem como o método de determinação de graus-dia apresentado por Ometto (1981).

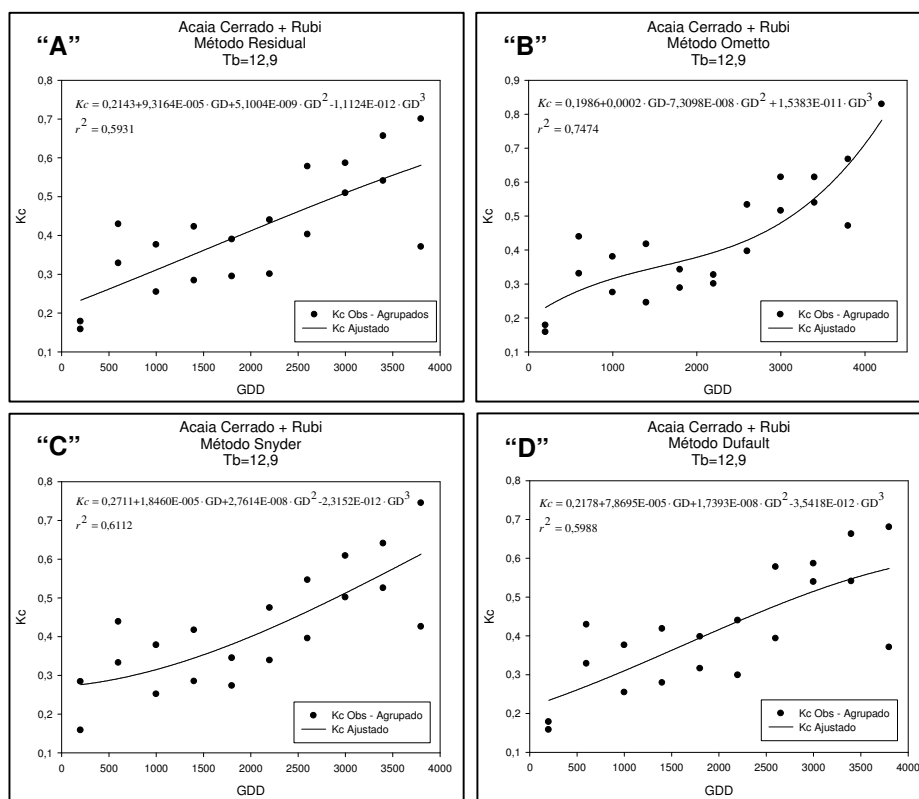


FIGURA 23 Curvas de Kc, em função de GDD, considerando os dados agrupados das cultivares Acaia Cerrado e Rubi, e os métodos, (A) residual, (B) Ometto (1981), (C) Snyder e (D) Dufault (1997). Lavras, MG. 2006.

Com os valores indicados de temperatura base inferior e superior e o método de determinação de GDD, chegou-se ao ajuste combinado de Kc para as cultivares Acaia Cerrado e Rubi, até 4200 GDD, conforme Figura 24, sendo os valores 0,20, 0,89 e 0,48, Kc mínimo, máximo e médio, respectivamente.

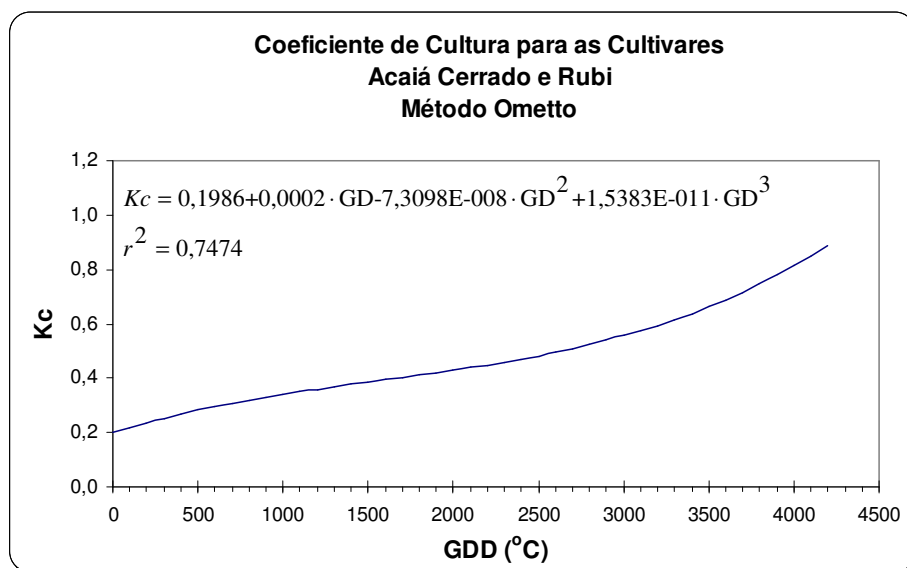


FIGURA 24 Coeficientes de cultura, em função de graus-dia de desenvolvimento, para café arábica, cultivares Acaiá Cerrado e Rubi, determinados entre o transplântio e a floração, nas condições climáticas de Lavras, MG.

Estes valores estão próximos aos encontrados por Oliveira (2003), 0,44 a 0,87, com valor médio de 0,51 para uma cultura de café recepado para o período de junho a outubro na região de Lavras, MG, principalmente do valor máximo e aos citados por Santinato et al. (1996), que apresentam valores de Kc iguais a 0,6, 0,7 e 0,8, em lavouras com até 12 meses e com densidades de 2.500, 3.300 e 6.700 plantas ha⁻¹, respectivamente. O valor máximo, 0,89, encontrado neste experimento, corresponde a 3.600 plantas ha⁻¹, o que está próximo do valor de 6.700 plantas ha⁻¹, sugerido por Santinato et al. (1996), embora esta densidade seja praticamente o dobro deste experimento. Os valores obtidos neste experimento diferem um pouco dos encontrados por Arruda et al. (2000), que

encontraram entre 0,73 e 0,75 nos primeiros anos de idade da planta; por Guitiérrez & Meinzer (1994), que sugerem 0,58 para cafeeiros com 1 ano de plantio e por Clowes (1984), que considerou um valor médio de 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro.

Percebe-se certa variação dos resultados encontrados em relação às sugestões e indicações verificadas na literatura. Conforme Carr (2001), existem poucas informações sobre o consumo hídrico das culturas e os métodos atuais de estudo desse parâmetro, para fins de irrigação, são imprecisos e sujeitos a erros, devendo-se testar a validade desses valores.

4.8 Crescimento vegetativo

Para o acompanhamento do crescimento vegetativo das cultivares Acaia Cerrado e Rubi, foram realizadas 21 avaliações de altura de planta (Apl), diâmetro de copa (Dco), diâmetro de caule (Dca) e comprimento do ramo plagiotrópico (Crp), com intervalos médios de quinze e trinta dias entre as avaliações. Os intervalos menores foram usados no período de maior desenvolvimento da planta, e os maiores no período de menor desenvolvimento.

A análise destas variáveis foi conduzida da mesma forma que a análise de Kc, em função de GDD. Para isso, acompanhou-se, dentro de intervalos de 400 GDD, o crescimento vegetativo de ambas as cultivares, em que cada valor das variáveis determinadas foi obtido por meio da média de duas repetições.

Para esta análise, foram usados os valores determinados de Tb (12,9°C) e TB (32,4°C), assim como o método de determinação de graus-dia apresentado por (Ometto, 1981). Os parâmetros resultantes das regressões polinomiais de 3º grau encontram-se na Tabela 10.

TABELA 10 Parâmetros da equação de regressão polinomial de 3º grau, para as variáveis médias de desenvolvimento determinadas em diferentes datas de transplântio de café arábica, cultivar Acaiá Cerrado e Rubi. Procedimento de acordo com o método de determinação de graus-dia apresentado por Ometto (1981) usando a $T_b = 12,9^\circ\text{C}$. Lavras, MG. 2006.

Tb	Parâm.	Apla	Dco	Dca	Crp
'Acaiá Cerrado'					
12,9°C	y_o	31,3106	-6,5857	2,7152	-3,7302
	a	2,0948e-3	0,0272	2,1804e-3	8,0292e-3
	b	4,0565e-6	-5,8013e-6	5,5916e-8	1,6471e-6
	c	-5,9120e-11	1,2740e-9	1,5239e-10	1,1281e-12
	r²	0,99**	0,99**	0,99**	0,99**
'Rubi'					
12,9°C	y_o	20,1519	-4,6899	3,4258	-1,1529
	a	3,6984e-4	0,0193	-2,3792e-4	2,3335e-3
	b	6,6714e-6	2,3161e-6	2,2196e-6	6,5274e-6
	c	-1,0105e-9	-5,5612e-10	-2,9914e-10	-1,1047e-9
	r²	0,99**	0,99**	0,99**	0,99**

** Altamente significativo a 1%.

Observou-se que os modelos ajustados foram altamente significativos para todas as variáveis, tendo os coeficientes de determinação (r^2) sido iguais a 0,99 para a cultivar Acaiá Cerrado e para a cultivar Rubi, mostrando haver diferenças significativas de todas as variáveis de crescimento em função de graus-dia.

Analisando-se as equações de regressão após linearização, por meio do procedimento de Snedecor & Cochran (1989), para as cinco datas de transplântio

em que os graus-dia foram calculados segundo Ometto (1981), verificou-se que, das variáveis analisadas para as cultivares, apenas a Apla diferenciou-se estatisticamente, podendo inferir que a Apla mostrou-se diferente entre elas. Dessa forma, foram agrupados, independentemente, os parâmetros Dco para duas cultivares, assim como Dca e Crp. Em seguida, procedeu-se nova análise de regressão, cujos resultados estão representados no Tabela 11.

TABELA 11 Parâmetros da equação de regressão polinomial de 3º grau, para as variáveis médias de desenvolvimento determinadas em diferentes datas de transplântio de café arábica, cultivar Acaiá Cerrado e Rubi. Procedimento de acordo com o método de determinação de graus-dia, apresentado por Ometto (1981) usando a $T_b = 12,9^\circ\text{C}$. Lavras, MG. 2006.

Tb	Parâm.	Dco	Dca	Crp
		‘Acaiá Cerrado’ + ‘Rubi’		
	y_0	-5,6378	3,0705	-2,4415
	a	0,0233	9,7123e-4	5,1814e-3
12,9°C	b	-1,7426e-6	1,1378e-6	4,0872e-6
	c	3,5892e-10	-7,3377e-11	-5,5178e-10
	r²	0,97**	0,98**	0,96**

** Altamente significativo a 1%.

Verifica-se que os coeficientes de determinação (r^2) ainda permaneceram altos, variando agora de 0,96 a 0,98 e sendo os modelos altamente significativos. Pode-se, assim, inferir que houve diferenças entre cada uma das variáveis em função do acúmulo de graus-dia.

Os resultados mostrados nas Figuras 25B a 25D evidenciam haver um bom ajuste de Kc em função do acúmulo de graus-dia para os parâmetros Dco,

Dca e Crp, podendo-se utilizar uma única equação de regressão para representar cada um destes parâmetros para ambas as cultivares.

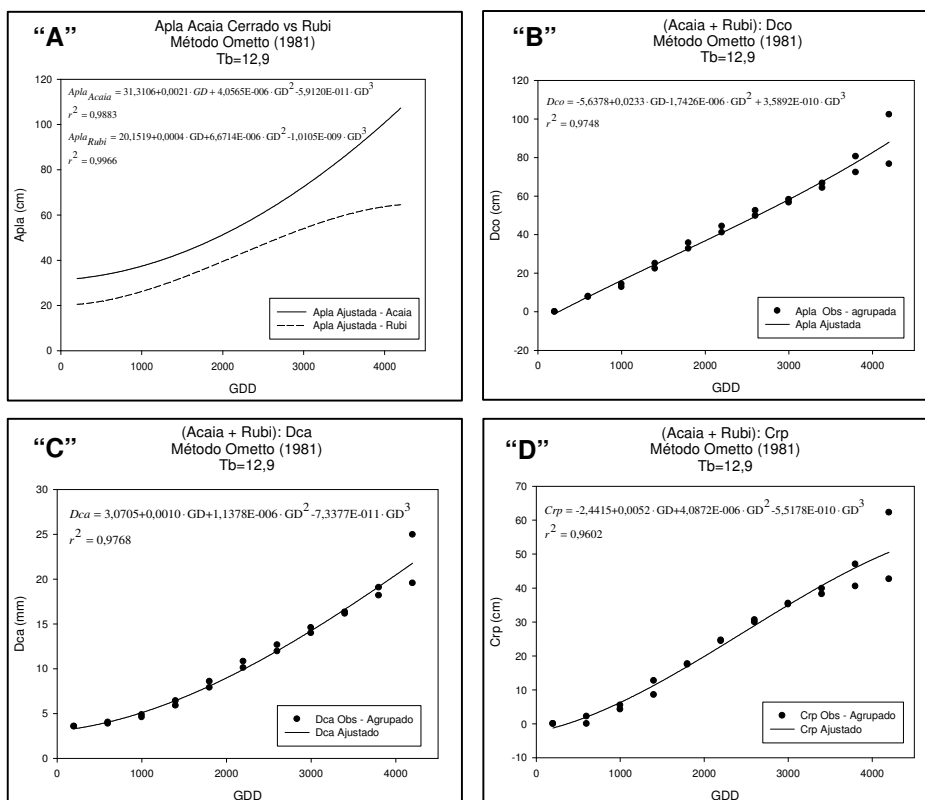


FIGURA 25 Curvas de altura de planta, Apl, (A) para as cultivares Acaia Cerrado e Rubi e de diâmetro de copa, Dco, (B), diâmetro de caule, Dca, (C) e de comprimento do ramo plagiotrópico, Crp, (D) agrupados para as duas cultivares, para as condições climáticas de Lavras, MG. 2006.

No entanto, na Figura 25A, verifica-se o contrário, em que a cultivar Acaiá Cerrado, de maior porte, mostra, para o intervalo máximo de GDD analisado, uma resposta bem definida de crescimento, em função do acúmulo de GDD. Até a, aproximadamente, 2500 GDD ambas as cultivares têm a Apla desenvolvendo-se paralelamente. A partir deste valor acumulado, verifica-se, para a cultivar Rubi, que ocorre uma certa redução para a taxa de crescimento em relação à cultivar Acaiá Cerrado. Com isso, há a necessidade de se utilizar, para representar a Apla para cada cultivar, duas equações distintas.

Recalculando-se a significância do 'F' pelo procedimento de Snedecor & Cochran (1989), tem-se uma nova análise, na qual verifica-se que não houve influência de GDD sobre cada uma das variáveis de crescimento, comparando-se os dados agrupados de ambas as cultivares com os dados independentes do mesmo parâmetro para cada cultivar. Ou seja, Dco ('Acaiá Cerrado' + 'Rubi') versus Dco ('Acaiá Cerrado'); Dco ('Acaiá Cerrado' + 'Rubi') versus Dco ('Rubi'); Dca ('Acaiá Cerrado' + 'Rubi') versus Dca ('Acaiá Cerrado'); Dca ('Acaiá Cerrado' + 'Rubi') versus Dca ('Rubi'); Crp ('Acaiá Cerrado' + 'Rubi') versus Crp ('Acaiá Cerrado') e Crp ('Acaiá Cerrado' + 'Rubi') versus Crp ('Rubi').

Esta parte da análise confirma o fato de se poder usar uma única equação para representar, para ambas as cultivares, os parâmetros Dco, Dca e Crp, como função de GDD.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram as seguintes conclusões para cafeeiro arábica:

1. as temperaturas base inferior e superior para as cultivares Acaiá Cerrado e Rubi são de 12,9°C e 32,4°C, respectivamente do transplântio até a primeira florada;
2. o método de determinação de graus-dia apresentado por Ometto (1981) foi o que melhor caracterizou a constante térmica para as cultivares Acaiá Cerrado e Rubi, desde o transplântio até a primeira florada, 3.735,55 GDD (°C);
3. os coeficientes de cultura ajustam-se satisfatoriamente a graus-dia de desenvolvimento por meio de uma regressão polinomial de 3º grau;
4. cada variável de crescimento como função de GDD, com exceção de altura de planta, pode ser representada por uma única equação polinomial de 3º grau.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lisimeters**. Rome: FAO, 1982. 68 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 39).
- ALFONSI, R. R. Histórico climatológico da cafeicultura brasileira. **O Cafezal (Coffee Break)**: Informativo Garcafe, maio 2000. Disponível em <<http://www.coffeebreak.com.br>>. Acesso em: 27 out. 2005.
- ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **International Commission on Irrigation and Drainage**, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 93, 1994.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome, Italy: FAO, 1998. 301 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n. 56).
- ANDRADE, C. de L. T. de; COELHO, E. F.; COUTO, L.; SILVA, E. L. da. Parâmetros de solo – água para a engenharia de irrigação e ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Vigésimo sétimo...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 01-39.
- ANDREATTA, J. A. **Determinação da razão entre a evapotranspiração máxima de dois cultivares de milho (*Zea mays* L.) e a evapotranspiração potencial**. 1990. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.
- ANTUNES, R. C. B.; MONTOVANI, E. C.; COSTA, L. C.; RENA, A. B.; ALVARENGA, A. de P. Determinação da evapotranspiração da cultura do cafeeiro em formação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos...** Brasília: EMBRAPA Café e MINASPLAN, 2000. v. 2, p. 810.
- AGRIANUAL 2004: anuário da agricultura brasileira. São Paulo: FNP, 2004. p. 185-202.
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Maryland, v. 74, p. 430-45, Dec. 1959.

ARRUDA, F. B.; IAFFE, A.; SAKAI, E.; CALHEIROS, R. O. Resultados anuais do coeficiente de cultura do cafeeiro em um ensaio em Pindorama/SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Brasília: Embrapa Café/MINASPLAN, 2000. v. 2, p. 790-793.

BARROS, R. S.; MAESTRI, M.; RENA, A. B. Coffee crop ecology. **Tropical Ecology**, Varanasi, v. 36, n. 1, p. 1-19, 1995.

BUTLER, T. J.; EVERS, G. W.; HUSSEY, M. A.; RINGER, L. J. Flowering in crimson clover as affected by planting date. **CropScience**, Madison, v. 42, n. 1, p. 242-247, Jan./Feb. 2002a.

BUTLER, T. J.; EVERS, G. W.; HUSSEY, M. A.; RINGER, L. J. Rate of leaf appearance in crimson clover. **CropScience**, Madison, v. 42, n. 1, p. 237-241, Jan./Feb. 2002b.

BOLONHEZI, D. **Épocas de semeadura do algodoeiro: características agrônômicas, tecnológicas da fibra, determinação da temperatura base e graus-dia**. 2000. 182 p. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais Climatológicas: 1961-1990**. Brasília: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.

BURMAN, R. D.; NIXON, P. R.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W. O. Water requirements. In: JJENSEN, M. E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1980. cap. 6, p. 189-232.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, micro aspersión, exudación**. 3. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 511 p.

CAMARGO, A. P. de; DANTAS, F. A. S.; MATIELLO, J. B. e RIBEIRO, R. N. de C. Efeito da época e quantidade de rega em café arábica nas condições climáticas de inverno úmido e verão seco, de Garanhuns (PE) - Parte III. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 13., 1986, São Lourenço. **Anais...** Rio Janeiro: IBC, 1986. p. 47-50.

CAMARGO, A. P. de; GROHMANN, F; DESSIMONI E TEIXEIRA, A. A. Efeito na produção do café de épocas de rega e supressão da chuva, por meio de cobertura transparente (Barçaça) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 11., 1984, Londrina. **Anais...** Rio de Janeiro: IBC, 1984. p. 62-64.

CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requeriments of coffe. **Experimental Agriculturae**, Cambridge, v. 37, n. 1, p. 1-36, 2001.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 23-28, jan./abr. 2000.

CLARKE, R. J.; MACRAE, R. **Coffee Agronomy**. Barking: Elsevier, 1985. p. 334.

CLOWES, M. S. J. Drip irrigation on coffee. **Zimbabwe Agricultural Journal**, Harare, v. 81, n. 6, p. 215-219, 1984.

COELHO, M. R. **Coefficiente de cultura (kc) e desenvolvimento inicial de duas variedades de cafeeiro (*Coffea arábica* L.) associados à graus-dia**. 2004. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Rome: FAO, 1979. 212 p. (FAO Riego y drenage, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requeriments**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J.; BOTREL, T. A. et al. Programa para confecção da água no solo utilizando modelo Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, p. 92-102, jul. 1990.

DUFAULT, R. J. Determining heat unit requirements for broccoli in coastal South Carolina. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 122, n. 2, p. 169-174, Mar. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FOX Jr.; F. A.; SHERER, T.; SLACK, D. C.; CLARK, L. J. **Arizona Irrigation Scheduling – AZSCHED ver. 1. 01 – Users Manual**. Arizona: The University of Arizona/Cooperative Extension/ Agricultural and Biosystems Engineering, 1992. 36 p.

GUANDIQUE, M. E. G. **Balço hídrico no solo e consumo de água pela cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. 1993. 94 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

GUANDIQUE, M. E. G.; LIBARDI, P. L. Balço hídrico no solo e consumo de água para a cultura de Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA/ESALQ/USP, 1997. p. 638-640.

GUTIERREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 119, n. 3, p. 653-657, May 1994.

IAFFE, A.; PINTO, H.; ARRUDA, F. B.; QUAGLIA, L.; SAKAI, E.; PIRES, R. C. M.; ASSAD, E. Estimativa de temperatura-base e graus-dia com correção pelo fotoperíodo do florescimento à colheita de café em Campinas, SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001.

JACOMAZZI, M. A. **Programa para estimativa do rendimento das culturas pela simulação da irrigação por balanço hídrico seqüencial**. 2004. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999. 497 p.

LOZADA GARCIA, B. I. **Determinação de temperatura-base e influência de variáveis climáticas na duração do ciclo e na produção do milho**. 1993. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MATIELLO, J. B. **O Café** – do cultivo ao consumo. São Paulo: Editora Globo, 1991. 320 p.

MATIELLO, J. B.; DANTAS, F. de A. de S. Desenvolvimento do cafeeiro e do seu sistema radicular, com e sem irrigação, em Brejão (PE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 14., 1987, Campinas. **Anais...** Rio de Janeiro: IBGE, 1987.

MATZENOUER, R; BERGAMASCHI, H; BERLATO, M. A.
Evapotranspiração da cultura do milho II- relação com evaporação do tanque classe A, com evaporação de referência e com a radiação solar global em três época de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 15-20, jan./jun. 1998.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MELO, M. A. N. **Determinação da necessidade térmica, adequação de coeficiente da cultura e efeito da irrigação e da adubação nitrogenada na produção do maracujazeiro amarelo**. 2001. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, v. 19, p. 205-234, 1965.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. 7. ed. São Paulo: Nobel, 1986. 376 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, Mar. 1976.

NETO, A. C. F.; MONTOVANI, E. C.; RENA, A. B. et al. Determinação da evapotranspiração de dois cultivares de café arábica na fase de maturação dos frutos. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DO CAFÉ DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Resumos...** Vitória: Embrapa Café, 2001. p. 44.

NUNES, M. A.; DIAS, M. A.; RAMALHO, J. D. C.; DIAS, M. A. Effect of nitrogen supply on the photosynthetic performance of leaves from coffee plants exposed to bright light. **Journal of Experimental Botany**, Cambridge, v. 44, n. 262, p. 893-899, May 1993.

OLIVEIRA, P. M. de. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 2003. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres 1981. 440 p.

PEDINI, S. A produção de café orgânico. In: WORKSHOP SISTEMAS AGROFLORESTAIS PARA O CULTIVO DO CAFÉ, 2., 2000, Machado. p. 11-12.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceeding of the Royal Society of London**, Serie A, London, v. 193, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PERES, J. G. **Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do Estado de São Paulo**. 1994. 116 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

REICHARDT, K. Balanço Hídrico. In: _____. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. cap. 9, p. 113-126.

ROSE, C. W.; STERN, W. R. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 5, n. 1, p. 11-19, 1967.

SAMMIS, T. W.; MAPEL, C. L.; LUGG, D. G.; LANSFORD, R. R.; MCGUCKIN, J. T. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 3, p. 773-780, May/June 1985.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore Agrícola, 1996. 145 p.

SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1987. 143 p.

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** Piracicaba, 1998. 97 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

SILVA, E. L.; MARTINEZ, L. F.; YITAYEW, M. Relação entre coeficientes de cultura e graus-dia de desenvolvimento da alface. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 134-142, jul. 1999.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements.** Rome: FAO, 1991. 45 p.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods.** 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.

SNYDER, R. L. Hand calculating degree days. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 35, n. 1/4, p. 353-358, 1985.

SOUSA, M. B. A.; MONTOVANI, E. C.; SILVA, J. G. F.; SOARES, A. A. Estudo do consumo de água do cafeeiro em fase de produção, irrigado por pivô-central, na região norte do Espírito Santo e extremo sul da Bahia. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DO CAFÉ DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Resumos...** Vitória: Embrapa Café, 2001. p. 48.

TOSSO, J. T.; TORRES, J. J. Relaciones hidricas de la vid, bajo diferentes niveles de riego usando goteo, aspersion y surcos. I. Evapotranspiracion y eficiencia en el uso del agua. **Agricultura Tecnica**, Mexico, v. 46, p. 193-198, 1986.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia.** Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2000. 509 p.

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos climáticos de estimativa de aplicação de água de irrigação.** Piracicaba: ESALQ. Departamento de Física e Meteorologia, 1983. 22 p.

VOLPE, C. A. Fenologia dos citros. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CITROS, 2., 1992, Bebedouro. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p. 107-120.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage**, New York, v. 108, n. 1, p. 57-75, Mar. 1982.

WRIGHT, J. L.; JENSEN, M. E. Peak water requirements in southern Idaho. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 98, n. 2, p. 193-201, June 1972.

YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, n. 1/2, p. 61-74, Apr. 1995.