



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA**

DANILTON LUIZ FLUMIGNAN

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, SEUS COMPONENTES E
COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DE
CAFEEIROS**

Londrina
2008

DANILTON LUIZ FLUMIGNAN

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, SEUS COMPONENTES E
COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DE
CAFEEIROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Egídio Cavenaghi
Prete

Co-orientador: Dr. Rogério Teixeira de Faria

Londrina
2008

Catálogo na publicação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F646e Flumignan, Danilton Luiz.

Evapotranspiração, seus componentes e coeficientes de cultivo simples e dual de cafeeiros / Danilton Luiz Flumignan. – Londrina, 2008.
80f. : il.

Orientador: Cássio Egídio Cavenaghi Prete.

Co-orientador: Rogério Teixeira de Faria.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2008.

Bibliografia: f. 75-80.

1. Evapotranspiração – Teses. 2. Café – Cultivo – Teses. 3. Café – Irrigação – Teses. I. Prete, Cássio Egídio Cavenaghi. II. Faria, Rogério Teixeira de. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 631.67

DANILTON LUIZ FLUMIGNAN

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO, SEUS COMPONENTES E
COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DE
CAFEEIROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Rogério Teixeira de Faria (Co-orientador)
Iapar

Prof. Dr. Édison Miglioranza
UEL

Dr. Paulo Henrique Caramori
Iapar

Prof. Dr. Cássio Egídio Cavenaghi Prete
Orientador
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 12 de fevereiro de 2008

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ermelindo e Sonia, meus irmãos, Danilo e Daniel e familiares, pessoas as quais eu procuro dar orgulho todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Ao meu co-orientador Dr. Rogério Teixeira de Faria, por trabalharmos juntos desde dezembro de 2002, oportunidade na qual me fez despertar interesse pelas áreas de Irrigação e Agrometeorologia. Agradeço pelos valiosos ensinamentos que foram sempre oportunos, pela amizade, confiança, cobrança e por ser personagem fundamental na minha carreira profissional. Muito obrigado!

Ao Iapar, por me abrir as portas profissionalmente, local onde fui sempre muito bem tratado e fiz muitos amigos. Vou sempre elevar o nome desta instituição.

Agradeço em especial o amigo e Técnico Agrícola José Carlos da Silva (Zé do Brejo), personagem fundamental nos trabalhos de campo, sem o qual o desenvolvimento desta dissertação não seria possível. Agradeço ainda os amigos e profissionais do Iapar, Ronaldo, Paçoca, Paulinho, Garcia, Pedrão, Campeão, Alexandre, Audilei, Carol, Bruno e Eduardo. Agradeço também os pesquisadores da Área de Engenharia Agrícola do Iapar, Adriano, Augusto, Paulo Figueiredo, Rubens e Ruy Casão.

Ao Departamento de Agronomia da UEL e seus professores, por transmitirem valiosos ensinamentos morais e agronômicos, local onde pude me graduar Engenheiro Agrônomo e me titular Mestre em Agronomia. Também irei sempre elevar o nome desta instituição.

Agradeço em especial os professores Dr. Cássio Egídio Cavenaghi Prete, pela disponibilidade de orientação e ajuda sempre que necessário, Dr. Deonísio Destro, grande amigo, fiel confidente e companheiro de arquibancada em dia de jogo do Londrina, Dr. Édison Miglioranza pelos valiosos conhecimentos transmitidos e competência profissional, Dr. Amarildo Pasini, Dra. Ana Maria de Arruda Ribeiro, Dra. Carmem Silvia Vieira Janeiro Neves, Dra. Cristiane de Conti Medina, Dr. Hideaki Wilson Takahashi, Dra. Inês Cristina de Batista Fonseca, Me. José Carlos Vieira de Almeida, Dr. Ricardo Ralisch, Dr. Ricardo Tadeu de Faria e Dr. Roberto Antunes Fioretto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UEL,

representado pela Coordenadora Dra. Carmem Sílvia Vieira Janeiro Neves e Secretária Weda Aparecida Westin, que cada vez mais vêm investindo seus esforços na melhoria do programa. Meus agradecimentos aos docentes do programa assim como aos colegas de mestrado e doutorado.

Aos membros da banca Prof. Dr. Édison Miglioranza e Dr. Paulo Henrique Caramori por aceitarem o convite de prontidão e pelas valorosas sugestões neste trabalho.

À Capes pelo financiamento da bolsa de mestrado.

Aos meus pais, Sr. Ermelindo Flumignan e Sra. Sonia Maria Botosso Flumignan por terem me ensinado os bons valores da vida como honestidade, responsabilidade, caráter, além de terem despendido muito amor por mim. Agradeço ainda aos meus irmãos Danilo e Daniel, minha avó Ofélia e a todos os meus familiares por serem a base forte da minha vida e o motivo do meu viver.

À minha namorada Patricia Tiemi de Paula Leite, uma pessoa muito especial, a qual tem me dado muito amor e carinho há três anos. Agradeço por compartilhar bons e maus momentos comigo, por me ajudar e compreender a minha ausência em alguns momentos em virtude dessa dissertação e por ser minha melhor amiga e companheira.

Aos meus amigos de todas as horas, em especial ao Chibana, que por muitas vezes me auxiliou nos trabalhos e à Heverly, que também ajudou sempre que precisei.

FLUMIGNAN, Danilton Luiz. **Evapotranspiração, seus componentes e coeficientes de cultivo simples e dual de cafeeiros**. 2008. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

RESUMO

A quantificação do consumo hídrico das culturas é fundamental para diversas aplicações na agricultura, tais como estudos de zoneamento agrícola, monitoramento agroclimático, estimativa de safras, manejo de irrigação e drenagem e estudos hidrológicos em geral. O conhecimento sobre o requerimento hídrico de cafeeiros ainda é bastante incipiente, sendo necessários estudos detalhados sobre o tema. O objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração (ET), evaporação (E), transpiração (T) e coeficientes de cultivo simples (Kc) e dual, coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb), para cafeeiros em fase de formação (primeiro e segundo ano) e produção (terceiro e quarto ano), conduzidos sob irrigação (aspersão e gotejamento) e sem irrigação, em Londrina, PR. Mediu-se ET com lisímetros de pesagem cultivados com cafeeiros da cultivar IAPAR 59, E com microlisímetros instalados sobre os lisímetros e T pela diferença entre ET e E. Os valores de Kc, Ke e Kcb foram determinados nos tratamentos irrigados pela razão entre ET, E e T, respectivamente, e a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método Penman-Monteith na escala diária e pelo método ASCE Penman-Monteith na escala horária. Os resultados mostraram que ET e Kc variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera, fase fenológica e evolução da área foliar. O tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou maiores valores médios anuais de ET (3,1, 3,4, 4,3 e 3,7 mm dia⁻¹ para o primeiro, segundo, terceiro e quarto ano, respectivamente), seguido do gotejamento (2,9, 3,7 e 3,1 mm dia⁻¹ para o segundo, terceiro e quarto ano, respectivamente) e do não irrigado (2,2, 2,5, 3 e 2,7 mm dia⁻¹ para o primeiro, segundo, terceiro e quarto ano, respectivamente). O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (0,99, 1,03, 1,3 e 1,1 para o primeiro, segundo, terceiro e quarto ano, respectivamente) e menor para o irrigado por gotejamento (0,92, 1,22 e 1,1 para o segundo, terceiro e quarto ano, respectivamente). Os valores de E e Ke, determinados apenas na fase de produção, variaram com a demanda da atmosfera e método de aplicação de água. Esses fatores influenciaram T e Kcb, além da fenologia e evolução da área foliar. Os valores de E representaram 21 a 57%, 21 a 54% e 21 a 66% os valores de ET, enquanto T representou 43 a 79%, 46 a 79% e 34 a 79% os valores de ET medidos no tratamento sob aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente. Os valores de Ke variaram de 0,19 a 0,79 e 0,15 a 0,39, enquanto os valores de Kcb variaram de 0,35 a 1,09 e 0,33 a 0,79, no tratamento irrigado por aspersão e gotejamento, respectivamente.

Palavras-chave: Lisímetro. Microlisímetro. Evaporação. Transpiração. *Coffea arabica*.

FLUMIGNAN, Danilton Luiz. **Evapotranspiration, its components and single and dual crop coefficients of coffee trees**. 2008. 90f. Dissertation (Máster degree in Agronomy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

ABSTRACT

Quantifying crop consumptive use is essential for many applications in agriculture, such as crop zoning, climate monitoring, yield estimation, irrigation and drainage management and hydrological studies. The knowledge about water requirement of coffee plants is still incipient, which demands research on such field. The objective of this study was to determine the evapotranspiration (ET), evaporation (E), transpiration (T), in addition to single (Kc) and dual crop coefficients, evaporation coefficient (Ke) and basal crop coefficient (Kcb), for coffee trees during crop formation (1st and 2nd year) and crop production (3rd and 4th year), conducted under sprinkler and drip irrigation and no irrigation, in Londrina, PR, Brazil. Crop ET was measured by weighing lysimeters cultivated with coffee plants of cultivar IAPAR 59, E was measured by microlysimeters installed on the lysimeters and T was obtained by the difference between ET and E. The Kc, Ke and Kcb values were determined for the irrigated treatments by the ratio between ET, E and T, respectively, and reference evapotranspiration (ET_o) estimated with the Penman-Monteith method on daily scale and with the ASCE Penman-Monteith method on hourly scale. The values of ET and Kc were influenced by irrigation method, rainfall frequency, atmospheric demand, crop phenology and leaf area evolution. The sprinkler irrigated treatment presented the higher mean annual ET values (3.1, 3.4, 4.3 and 3.7 mm day⁻¹ for the 1st, 2nd, 3rd and 4th year, respectively), followed by drip irrigation (2.9, 3.7 and 3.1 mm day⁻¹ for the 2nd, 3rd and 4th year, respectively) and no irrigation (2.2, 2.5, 3 and 2.7 mm day⁻¹ for the 1st, 2nd, 3rd and 4th year, respectively). The mean annual Kc value was higher under sprinkler (0.99, 1.03, 1.3 and 1.1 for the 1st, 2nd, 3rd and 4th year, respectively) and lower for drip irrigation (0.92, 1.22 and 1 for the 2nd, 3rd and 4th year, respectively). The measurements of E and Ke, determined only during crop production, varied due to atmospheric demand and water application method. These factors, in addition to crop phenology and leaf area evolution, influenced T and Kcb. The measured values of E represented 21 to 57%, 21 to 54% and 21 to 66% of ET, while T was 43 to 79%, 46 to 79% and 34 to 79% of ET measured on sprinkler, drip and no irrigation treatments, respectively. The Ke values varied from 0.19 to 0.79 and 0.15 to 0.39, while Kcb varied from 0.35 to 1.09 and 0.33 to 0.79 for sprinkler and drip irrigation, respectively.

Keywords: Lysimeter. Microlysimeter. Evaporation. Transpiration. *Coffea arabica*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 O CAFEIEIRO	12
2.1.1 Panorama da cafeicultura.....	12
2.1.2 Características do cafeeiro.....	13
2.1.3 Fenologia do cafeeiro.....	14
2.1.4 Exigências climáticas	16
2.2 IRRIGAÇÃO NA CAFEICULTURA	17
2.2.1 Panorama da cafeicultura irrigada no Brasil.....	17
2.2.2 Métodos de irrigação	17
2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	18
2.3.1 Fatores que influenciam a evapotranspiração.....	20
2.3.2 Métodos para determinação da evapotranspiração	21
2.4 EVAPORAÇÃO	22
2.4.1 Fatores que influenciam a evaporação.....	23
2.4.2 Descrição do processo evaporativo	24
2.4.3 Métodos para determinação da evaporação	25
2.5 TRANSPIRAÇÃO	26
2.5.1 Fatores que influenciam a transpiração.....	27
2.5.2 Métodos para determinação da transpiração	28
2.6 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA	29
2.6.1 Métodos para determinação da evapotranspiração de referência.....	29
2.7 COEFICIENTE DE CULTIVO	31
2.7.1 Coeficiente de cultivo simples	31
2.7.2 Coeficiente de cultivo dual.....	32
2.7.2.1 Coeficiente de evaporação.....	32
2.7.2.2 Coeficiente de cultivo basal.....	33
3 ARTIGO A: EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO DE CAFEIROS EM FASE DE FORMAÇÃO	34
3.1 Introdução	36

3.2 Material e Métodos.....	38
3.3 Resultados e Discussão	42
3.4 Conclusões.....	53
4 ARTIGO B: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, SEUS COMPONENTES E COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DE CAFEIROS EM FASE DE PRODUÇÃO	54
4.1 Introdução	56
4.2 Material e Métodos.....	58
4.3 Resultados e Discussão	64
4.3.1 Crescimento e produtividade.....	64
4.3.2 Determinação da evapotranspiração.....	67
4.3.3 Determinação dos coeficientes de cultivo	71
4.3.3.1 Determinação do coeficiente de cultivo simples.....	71
4.3.3.2 Partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração e determinação do coeficiente de cultivo dual	74
4.4 Conclusões.....	82
5 CONCLUSÕES GERAIS	84
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

A água constitui componente fundamental da estrutura e dos processos biológicos das plantas. Assim, a quantificação do consumo hídrico das culturas é de suma importância para diversas aplicações na agricultura, tais como estudos de zoneamento agrícola, monitoramento agroclimático, estimativa de safras, manejo de irrigação e drenagem e estudos hidrológicos em geral.

Essa quantificação possibilita otimizar o uso da água no meio agrícola, proporcionando aumento de renda, minimização dos riscos da exploração agrícola e redução do impacto ambiental, contribuindo assim, para a viabilidade e sustentabilidade da atividade.

No cenário das mudanças climáticas globais, espera-se que a elevação da temperatura, juntamente com a ocorrência de estiagens mais frequentemente, irão resultar em aumento da demanda hídrica das plantas. Isso implica dizer que áreas antes consideradas aptas para o cultivo do café passarão a ser marginais, provocando drástica desorganização na cafeicultura brasileira e mundial (ASSAD et al., 2004; IPCC, 2008).

No entanto, segundo Fazuoli, Thomaziello e Camargo (2007), a adoção de determinadas práticas de cultivo, tais como a irrigação, poderá ser uma das estratégias eficientes para mitigar o problema. A irrigação suplementa água para os cultivos nos momentos em que a precipitação é insuficiente, evitando a ocorrência de déficit hídrico. Além disso, a irrigação supre a umidade necessária ao processo evaporativo (calor latente), o que diminui o aquecimento do ar (calor sensível), amenizando temperaturas elevadas na região do dossel foliar.

Assim, a produção baseada apenas na obtenção de água via precipitação natural é cada vez menos sustentável e alternativas de manejo racional de água na cultura precisam ser estabelecidas. A prática da irrigação usando modernos métodos de aplicação de água tem se apresentado como prática viável e conveniente neste cenário de produção, porque possibilita elevar a produtividade com redução dos custos operacionais, devido ao baixo consumo de energia e elevada eficiência de aplicação de água.

Muitos estudos já foram realizados visando determinar o consumo hídrico das diversas culturas no mundo. Para a cultura do café existem poucas

informações sobre sua demanda hídrica e a maioria delas são apenas estimativas, ao invés de medidas diretas (CARR, 2001). Por serem estimativas pontuais, indiretas e válidas somente para o local e período em que foram obtidas, essas informações são de difícil aplicação prática e, por isso, não podem ser adotadas como referência nas aplicações em que são requeridas.

Há, portanto, a necessidade de estudos criteriosos e precisos a respeito do tema, a fim de se obter parâmetros confiáveis sobre o consumo hídrico de cafeeiros que possam subsidiar estudos de riscos climáticos e zoneamento agrícola, além de permitir o estabelecimento de estratégias de manejo de água por meio da irrigação.

Este trabalho teve como objetivos determinar a evapotranspiração, a evaporação, transpiração e coeficientes de cultivo simples e dual (coeficiente de evaporação e coeficiente de cultivo basal) de cafeeiros em fase de formação e produção, conduzidos sob irrigação por aspersão, gotejamento e sem irrigação em Londrina, PR.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O CAFEIEIRO

2.1.1 Panorama da Cafeicultura

A cultura do café consiste em uma das culturas de maior interesse agrícola no Brasil que é o maior produtor e exportador mundial. Outros países como Vietnã, Colômbia, Indonésia, Etiópia e Índia também se destacam na produção e exportação de café.

A produtividade média de café no Brasil não tem apresentado grandes variações ao longo dos últimos anos (1990 a 2006). Nesse período, a produtividade média variou de 830 a 1679 kg de café em coco ha⁻¹ (IBGE, 2008).

Em 2007, a área colhida de café no Brasil foi de 2.278.975 ha, representando 4,77% do total de 47.731.997 ha utilizados para produção agrícola. A produção de café beneficiado correspondente foi de aproximadamente 36 milhões de sacas de 60 kg, concretizando uma produtividade média nacional de 15,8 sacas de 60 kg ha⁻¹. Para 2008, espera-se uma redução na área a ser colhida para 2.198.758 ha (-3,5%) e um aumento na produção total para aproximadamente 41,9 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado (+16,3%), o que configura uma produtividade média nacional esperada de 19 sacas de 60 kg ha⁻¹ (+20,5%) (IBGE, 2008).

Na divisão por estados, os que apresentam maior produção são Minas Gerais (51,1%), Espírito Santo (23,9%), Bahia (6,6%), São Paulo (6,3%), Paraná (5,6%) e Rondônia (3,9%) (IBGE, 2008).

2.1.2 Características do cafeeiro

De acordo com Wrigley (1988), o cafeeiro é uma planta perene de caráter arbustivo que pertence à família Rubiaceae e ao gênero *Coffea*. Dentro do gênero *Coffea* a espécie mais cultivada no mundo é o café arábica (*Coffea arabica* L.), que por ter sido objeto de estudo neste trabalho, será a única espécie abordada.

Acredita-se que o centro de origem do café arábica esteja localizado nas florestas latifoliadas das montanhas das regiões de Jimma e Kaffa, na Etiópia, e no platô de Boma, no Sudão. Estas regiões estão situadas entre 6 e 9°N e 34 e 40°L, apresentando altitude variável entre 1.600 e 2.000 m acima do nível do mar, clima ameno onde a temperatura média varia entre 15 e 20 °C e precipitação média anual de 1.600 a 2.000 mm bem distribuídos e com uma estação seca bem definida que dura de 3 a 4 meses (MAESTRI; BARROS, 1977; CANNELL, 1985; WRIGLEY, 1988).

O cafeeiro se caracteriza por apresentar diferentes ramos e gemas. Basicamente, os ramos podem ser divididos em ortotrópicos e plagiotrópicos. O ramo ortotrópico apresenta crescimento vertical e constitui a ramificação principal da planta que é originada na fase de germinação da semente. A partir do ramo ortotrópico, surgem os ramos denominados plagiotrópicos, que crescem lateralmente ao ramo ortotrópico numa inclinação que varia de 45 a 90° e constituem a ramificação primária. Estes ramos começam a aparecer na planta na fase de muda a partir do 6° ao 10° nó, aparecendo continuamente depois e crescendo simultaneamente com o ramo ortotrópico (KUMAR, 1979; RENA; MAESTRI, 1985).

Na extremidade do ramo ortotrópico existe a gema apical, que controla o crescimento vertical da planta, que em condições de cultivo pode atingir 3 m. Na axila de cada folha do ramo ortotrópico existe uma série de 5 a 6 gemas que são conhecidas por “gemas seriadas” e acima delas, de forma isolada, uma única gema chamada “cabeça de série”, que se forma na planta a partir do 6° ao 10° nó. A gema cabeça de série e as seriadas são diferencialmente determinadas, de tal forma que a cabeça de série se desenvolve em um ramo plagiotrópico primário e, quando submetidas a temperaturas elevadas, as gemas seriadas podem se desenvolver em ramos “ladrões” que também crescem verticalmente. Normalmente os ramos ladrões surgem apenas quando o ramo ortotrópico é danificado ou decepado, de forma a

substituir a ramificação ortotrópica da planta (KUMAR, 1979; RENA; MAESTRI, 1985).

Nas axilas das folhas das ramificações plagiotrópicas primárias, existem gemas seriadas em número de 4 a 5 que apresentam comportamento fisiológico distinto daquelas localizadas no ramo ortotrópico. Essas gemas não dão origem a nenhum ramo ladrão, mas sim a ramificações secundárias que também crescem plagiotrópicamente ou a inflorescências que irão evoluir para frutos. Dessa mesma forma, ramificações secundárias ou de ordem superior apresentam o mesmo comportamento da ramificação plagiotrópica primária e são presentes em plantas mais velhas (KUMAR, 1979; RENA; MAESTRI, 1985).

2.1.3 Fenologia do Cafeeiro

O cafeeiro é uma planta um pouco distinta das demais, pois leva dois anos para completar o seu ciclo fenológico. Assim sendo, o cafeeiro forma os ramos vegetativos que contêm as gemas axilares no primeiro ano e no ano seguinte essas gemas evoluem para inflorescências e frutos.

Segundo Camargo e Camargo (2001), o ciclo fenológico do cafeeiro arábica para as condições tropicais do Brasil pode ser descrito em um modelo de seis fases distintas de tal forma que a 1ª e 2ª fases compreendem o primeiro ano fenológico e as demais fases (3ª a 6ª) compreendem o segundo ano (Figura 2.1). Além disso, no cafeeiro as atividades vegetativas e reprodutivas ocorrem conjuntamente no tempo, de tal forma que a mesma planta apresenta partes que estão vegetando e outras que estão reproduzindo.

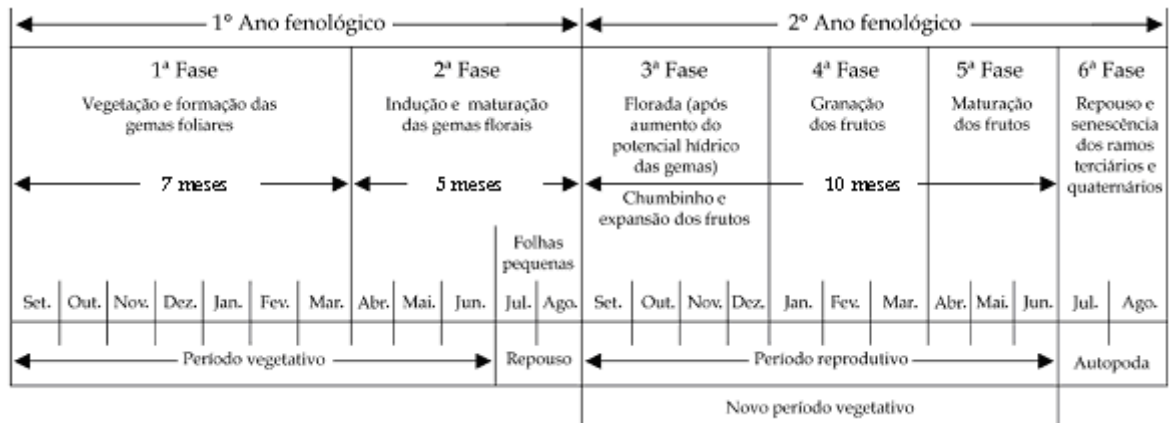


Figura 2.1 – Fases fenológicas do cafeeiro arábica (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

A 1ª fase vai de setembro a março do primeiro ano fenológico e compreende o período de vegetação e formação das gemas foliares. Nessa fase a água é bastante requerida para permitir que o cafeeiro possa formar bastante nós e área foliar, que possam suportar boa produção no ano seguinte.

Na 2ª fase, que vai de abril a agosto do primeiro ano fenológico, ocorre à indução das gemas foliares em gemas florais, que em seguida entram em maturação e dormência. Nos meses de julho e agosto a planta entra em um período considerado como repouso, sendo a água menos requerida.

A 3ª fase inicia o segundo ano fenológico e vai de setembro a dezembro. Essa fase corresponde ao início da florada após o aumento do potencial hídrico nas gemas florais maduras. Nessa fase, os cafeeiros que recebem água com muita frequência, apresentam floração indefinida. Segundo Rena e Maestri (1985), uma florada principal ocorre quando a planta é submetida a um período de restrição hídrica e em seguida recebe chuva ou irrigação abundante. Durante o início da florada, a ocorrência de déficit hídrico associado a temperaturas elevadas pode causar o abortamento das flores devido à desidratação dos tubos polínicos. Ainda na 3ª fase ocorre o surgimento dos chumbinhos e a expansão dos frutos. Havendo deficiência hídrica nessa etapa, pode ocorrer crescimento limitado dos frutos, resultando em frutos de volume pequeno.

Em seguida vem a 4ª fase que vai de janeiro a março do segundo ano fenológico e corresponde a fase de granação dos frutos, onde ocorre a solidificação dos líquidos internos, dando origem aos grãos. Essa fase coincide com

o verão, portanto um período bastante chuvoso. No entanto, a ocorrência de estiagens severas nessa fase pode resultar na formação de frutos chochos.

A 5ª fase que vai de abril a junho do segundo ano fenológico, corresponde à fase onde ocorre a maturação dos frutos. Nessa fase, a ocorrência de deficiências hídricas moderadas pode aumentar a qualidade do produto.

Por fim, a 6ª fase, que compreende os meses de julho e agosto do segundo ano fenológico, constitui a fase de senescência dos ramos produtivos não-primários, que secam e morrem, fenômeno esse conhecido por autopoda dos cafeeiros. Além disso, os meses de julho e agosto são considerados como período de repouso da planta.

2.1.4 Exigências climáticas

O cafeeiro não é uma cultura que tolera grandes variações de temperatura. Segundo Alègre (1959), temperaturas médias abaixo de 16 °C e acima de 23 °C não são apropriadas para o cafeeiro, sendo o intervalo de 18 a 21 °C considerado ótimo. Segundo Nunes, Bierhuizen e Ploegman (1968), temperaturas abaixo de 12 °C por longo período inibem o crescimento e desenvolvimento do cafeeiro e acima de 24 °C a fotossíntese diminui até ser irrisória aos 34 °C.

Conforme Maestri e Barros (1977), Rena e Maestri (1985), Carr (2001) e DaMatta (2004), a fotossíntese do cafeeiro é maior sob condições de baixa luminosidade do que a luz solar plena. Segundo esses autores, isso ocorre devido ao fato de que sob condições de alta luminosidade ocorre aumento da temperatura foliar e, conseqüentemente, os estômatos, que se localizam apenas na face abaxial da folha, se fecham. Segundo DaMatta (2004), não só a temperatura elevada, mas também a baixa umidade relativa do ar atua aumentando o déficit de pressão de vapor entre a folha e camada de ar limítrofe a mesma, de tal forma que os estômatos do cafeeiro tendem a se fechar diminuindo assim as trocas gasosas e, por conseqüência, a transpiração e a fotossíntese.

A precipitação ideal para o cultivo do cafeeiro é variável e depende entre outras coisas da quantidade e distribuição. Segundo Alègre (1959), a quantidade ótima se situa entre 1.200 e 1.800 mm anuais. Ainda assim, Maestri e

Barros (1977) sugerem que uma estação com chuvas bem distribuídas e outra seca são favoráveis ao cafeeiro, de tal forma que esse período seco é importante para o crescimento radicular, iniciação floral, maturação dos ramos formados na estação chuvosa e enchimento dos frutos.

2.2 IRRIGAÇÃO NA CAFEICULTURA

A irrigação na cafeicultura tem se tornado cada vez mais comum devido ao aumento da produtividade e longevidade do cafezal, minimização dos riscos de quebra de safra, redução dos efeitos da bienalidade, possibilidade de cultivo em áreas marginais, fixação do homem no campo, geração de empregos e aumento de renda não só para o produtor, mas também para a região na qual ele está inserido.

2.2.1 Panorama da cafeicultura irrigada no Brasil

Segundo Mantovani (2000), no ano de 2000 a cafeicultura irrigada ocupava cerca de 10% de toda área cultivada com café no Brasil, além de corresponder a 8,7% de toda a área irrigada do país. Segundo o autor, naquele ano a irrigação na cultura do café se concentrava principalmente nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e áreas menores em Goiás, Mato Grosso, Rondônia e São Paulo. Portanto, este panorama evidencia a importância da irrigação na cafeicultura e figura a cafeicultura como uma das principais culturas irrigadas no Brasil.

2.2.2 Métodos de irrigação

Dentre os métodos de irrigação existentes, a irrigação localizada e a

aspersão se destacam como os mais apropriados para a cultura do cafeeiro. Os sistemas mais utilizados na cafeicultura são a aspersão convencional, canhão hidráulico, autopropelido e pivô central, no caso da aspersão, e gotejamento, no caso do localizado (MANTOVANI, 2000).

Segundo Kruse, Bucks e von Bernuth (1990) e Bernardo, Soares e Mantovani (2005), o método de irrigação por aspersão consiste em aspergir a água sobre a superfície do terreno de forma a simular a chuva, em altas intensidades, porém com baixa frequência. Dessa forma, a irrigação por aspersão preconiza o molhamento de toda a área do terreno. Ainda segundo esses autores, o vento, a umidade relativa e a temperatura são os principais fatores climáticos que afetam o uso da irrigação por aspersão. O vento afeta a uniformidade de distribuição da água, e, juntamente com a umidade relativa e a temperatura, influencia as perdas por evaporação. Portanto, em regiões de ventos constantes e fortes, baixa umidade relativa e altas temperaturas, recomenda-se a utilização do sistema de irrigação por gotejamento, ao invés da aspersão, para evitar baixa uniformidade de aplicação de água e perdas elevadas por evaporação.

Segundo Mantovani (2000), o gotejamento é o sistema que melhor se ajusta para a cultura do cafeeiro. Nesse método, a água é aplicada ao solo diretamente na zona radicular, em pequenas intensidades (gota a gota), porém com alta frequência. Assim, devido a menor área molhada, as perdas por evaporação são reduzidas quando comparadas aos sistemas de irrigação por aspersão. Por apresentar maior custo de implantação, sistemas de irrigação por gotejamento devem ser utilizados em culturas de alto retorno econômico como o café (KRUSE; BUCKS; von BERNUTH, 1990; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005).

2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O consumo de água de uma cultura corresponde ao fluxo de vapor d'água do sistema solo-planta para a atmosfera, uma vez que é insignificante a quantidade de água armazenada nos tecidos da planta, podendo, portanto, ser expresso na forma de evapotranspiração (ET) (DOORENBOS; PRUITT, 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; PEREIRA;

VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997; ALLEN et al., 1998).

O processo de ET incorpora dois componentes distintos, a evaporação (E), da superfície do solo, e a transpiração (T), do dossel da planta. Segundo Allen et al. (1998), estes dois processos ocorrem separadamente, mas em geral são analisados conjuntamente por meio de ET devido à dificuldade de distinguí-los.

Segundo Allen et al. (1998), define-se ET da cultura sob condição padrão como sendo o consumo hídrico de uma grande superfície vegetada com um cultivo livre de doenças, pragas e plantas daninhas, bem fertilizado, conduzido sob ótima condição hídrica e que atinge máxima produção nas condições climáticas em que está inserido. No entanto, Allen et al. (1998) definem ainda ET da cultura sob condição não padrão, que se refere ao consumo de água de uma cultura em condições diferentes das descritas para a condição padrão.

Na fase inicial de formação do cafeeiro ocorrem baixos valores de ET, uma vez que a cultura cobre muito pouco o solo, sendo E praticamente o único componente de ET. Com o crescimento progressivo da área foliar, elevam-se as perdas por T, aumentando, por consequência, as taxas de ET. Dessa forma, ao final da fase de formação do cafeeiro, a participação de E no processo de ET é muito pequena, devido a grande área foliar da planta (Figura 2.2).

Na fase de produção, o cafeeiro apresenta valores de índice de área foliar (IAF) sempre altos de tal forma que o sombreamento do solo é bastante acentuado e as perdas por E reduzidas. No entanto, o cafeeiro apresenta oscilações de ganho e perda de área foliar todos os anos, aumentando a mesma na primavera-verão e diminuindo no outono-inverno. Por consequência, nos períodos de ganho de área foliar as perdas por E são diminuídas, T são aumentadas e no computo geral, os valores de ET são elevados. Por outro lado, no período de diminuição da área foliar, as perdas por E são aumentadas, T são reduzidas e no computo geral, os valores de ET são mais baixos (Figura 2.2).

Portanto, o cafeeiro em fase de produção apresenta esse comportamento em todos os anos produtivos, variando IAF e em função disso varia também a taxa transpiratória e evaporativa (Figura 2.2).

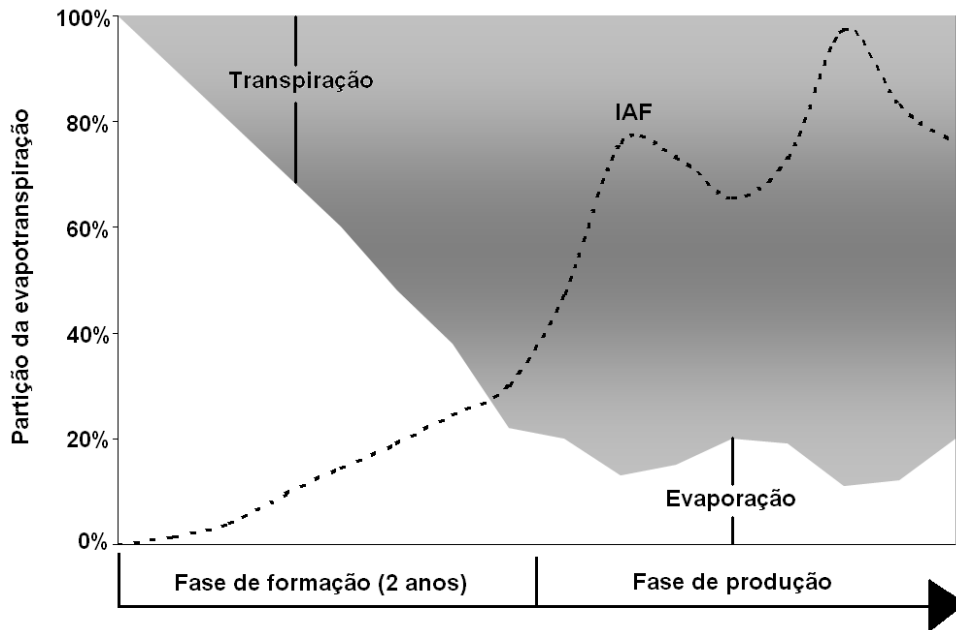


Figura 2.2 – Ilustração da partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração, em função do índice de área foliar (IAF), durante o ciclo fenológico do cafeeiro.

2.3.1 Fatores que influenciam a evapotranspiração

Segundo Allen et al. (1998), o clima, as características da cultura, o manejo e as condições ambientais são fatores que influenciam E e T, portanto ET.

Dos fatores relacionados ao conjunto solo e planta, os que mais influenciam ET são: E condicionada pela umidade da camada superficial do solo, principalmente em condições de pouca ou nenhuma cobertura do solo e T condicionada pela área foliar, características das folhas e do dossel foliar (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990).

Quanto ao clima, os principais elementos meteorológicos que influenciam ET são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998). Esses fatores influenciam ET devido ao fato de influenciarem E e T. Assim sendo, é de se esperar maiores valores de ET em condições de alta radiação solar, alta temperatura do ar, baixa umidade relativa e ventos fortes e constantes.

O tipo da cultura, variedade e estágio de desenvolvimento também são fatores que influenciam ET. Diferenças quanto à altura, rugosidade e albedo da

cultura, características de cobertura do solo e do sistema radicular, são fatores que resultam em diferentes níveis de ET nas diferentes culturas quando submetidas às mesmas condições ambientais. Outros fatores como a densidade de plantas e conteúdo de água no solo também devem ser considerados (ALLEN et al., 1998).

Em relação ao manejo e condições ambientais, fatores como salinidade, baixa fertilidade do solo, aplicações limitadas de corretivos e fertilizantes, presença de camadas compactadas, controle inadequado de pragas, doenças e plantas daninhas, e manejo precário do solo quanto às condições físicas, químicas e biológicas, são fatores que podem limitar o crescimento das culturas e reduzir ET (ALLEN et al., 1998).

2.3.2 Métodos para determinação da evapotranspiração

A medição de ET é onerosa por demandar equipamentos caros e de alta precisão, além de pessoal bem treinado. Embora não sejam apropriados para uso operacional, as medidas obtidas por métodos precisos são importantes para avaliar as estimativas de ET obtidas por métodos indiretos.

Na literatura há vários métodos de estimativa de ET, tais como fórmulas ou modelos de simulação que usam dados meteorológicos como entrada, além de métodos de medida direta, como balanço de água no solo, lisímetros, câmaras portáteis e balanço de energia (HATFIELD, 1990; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998).

Dentre todos os métodos de medida de ET, o uso de lisímetros de pesagem se destaca como o mais prático, preciso e sensível (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL; McCORMICK; PHENE, 1985; HATFIELD, 1990; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; WRIGHT, 1991; ALLEN et al., 1998).

Lisímetros de pesagem (Figura 2.3) consistem em tanques preenchidos com solo assemelhando-se ao encontrado nas condições naturais, no qual é cultivada a cultura de interesse e ET é obtida a partir da variação de massa do lisímetro (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL; McCORMICK; PHENE, 1985).

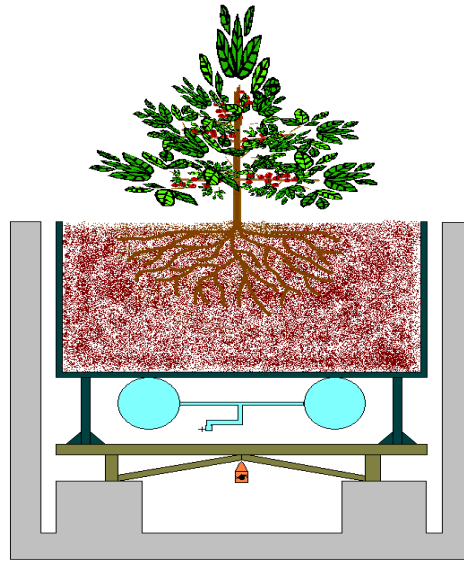


Figura 2.3 – Ilustração de um lisímetro de pesagem utilizado para medição da evapotranspiração.

Os lisímetros evoluíram muito nos últimos anos, sendo grande parte dessa evolução devida aos avanços na área da microeletrônica. Atualmente existem lisímetros de pesagem modernos como os de Dugas, Upchurch e Ritchie (1985), Howell, McCormick e Phene (1985), Miranda, Yoder e Souza (1999) e Faria, Campeche e Chibana (2006) que trabalham com precisão entre 0,02 e 0,18 mm na escala diária ou até mesmo horária, intervalos estes considerados excelentes segundo Hatfield (1990).

No entanto, Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997) e Allen et al. (1998) apontam que a obtenção de dados a partir de lisímetros é bastante difícil e onerosa, justificando seu uso apenas em condições experimentais, após a calibração do sistema nas condições do estudo para que se obtenham dados confiáveis.

2.4 EVAPORAÇÃO

Segundo Reichardt (1985), Sinclair (1990) e Allen et al. (1998), E consiste na passagem da água do solo da forma líquida para a forma gasosa na atmosfera, sendo este processo único e exclusivamente regido por leis físicas.

2.4.1 Fatores que influenciam a evaporação

Sem considerar a disponibilidade de água nos horizontes superficiais, E de um solo cultivado é dependente principalmente da quantidade de energia que chega até a superfície do mesmo (ALLEN et al., 1998). A quantidade de energia varia ao longo do ciclo da cultura em função do percentual de cobertura do solo pelo dossel, expressando variações em E conforme mostrado na Figura 2.2.

Assim, a taxa de E do solo é bastante influenciada pela quantidade de energia disponível para evaporar a água, sendo a principal fonte de energia a radiação solar (TANNER, 1957). A radiação aquece a superfície do solo e as camadas de ar próximas ao solo, causando elevação da temperatura, disponibilizando mais energia para o processo evaporativo. A umidade do ar também influi em E à medida que a passagem da água do solo para a atmosfera se dá pela diferença de pressão de vapor que é maior em condições de ar seco em relação ao ar úmido. Por fim, o vento favorece E devido ao fato de que a corrente de ar remove o ar úmido que está em contato com a superfície do solo e deixa o ar seco em seu lugar, aumentando assim o déficit de pressão de vapor (ALLEN et al., 1998).

Portanto, é de se esperar que as maiores taxas de E sejam encontradas em ambientes com alta incidência de radiação, altas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e alta intensidade de ventos.

Apesar de E ser um processo altamente dependente das condições meteorológicas reinantes, também é influenciado pelas condições de umidade do solo e características de movimentação da água no solo. Isso se observa quando ocorre o secamento da superfície do solo em decorrência de E , fazendo com que a água presente nas camadas mais profundas se movimente em direção a superfície do solo pela diferença de potencial mátrico e permitindo, assim, que continue o processo de E (LEMON, 1956; TANNER, 1957; RITCHIE, 1972; REICHARDT, 1985; SINCLAIR, 1990).

2.4.2 Descrição do processo evaporativo

Lemon (1956) dividiu o processo evaporativo de um solo em três fases distintas (Figura 2.4).

A primeira fase caracteriza-se por apresentar taxa de E constante e dependente somente das condições reinantes na atmosfera junto ao solo, tais como energia radiante, temperatura, umidade do ar e vento. Essa fase independe das condições de umidade do solo, embora se considere que não há restrição ao fluxo ascendente de água no perfil do solo. A primeira fase termina quando se estabelece uma resistência ao fluxo de água em direção a superfície do solo e a taxa de E deixa de ser constante, decrescendo com o tempo.

Na segunda fase, as condições intrínsecas do solo limitam o transporte de água no perfil e, conseqüentemente, a taxa de E. Desta forma, Lemon (1956) considera que a taxa de E decresce linearmente com o decréscimo na umidade média do perfil do solo e as condições atmosféricas reinantes não são mais de importância fundamental.

Quando a variação de E em resposta ao decréscimo de umidade do solo se torna muito pequena, perdendo a linearidade, inicia-se a terceira fase do processo. Essa fase caracteriza-se por um movimento bastante lento de água em direção à superfície, decorrente da baixa condutividade hidráulica do solo.

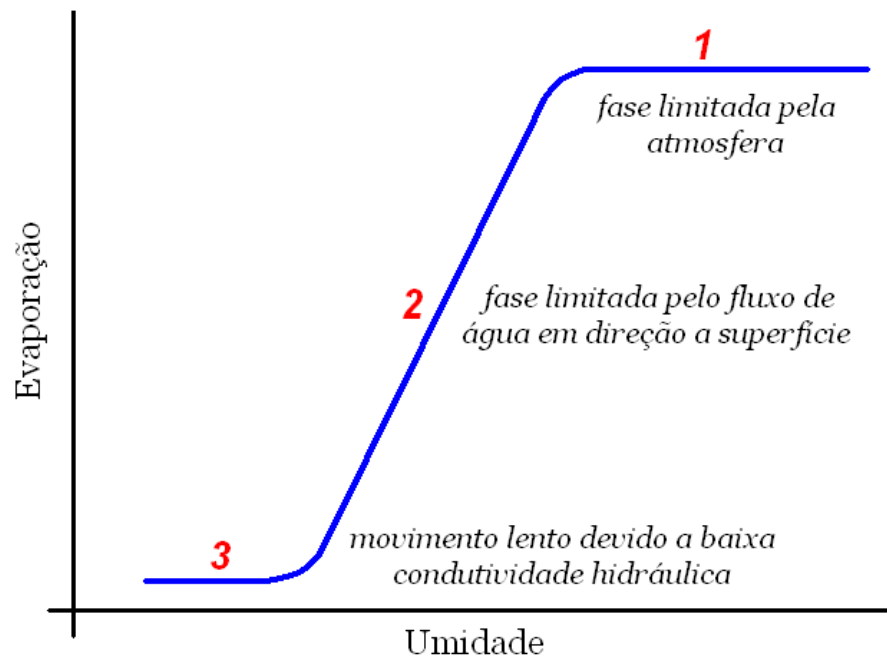


Figura 2.4 – Descrição de Lemon (1956) para o processo de evaporação do solo.

2.4.3 Métodos para determinação da evaporação

A quantificação de E é bastante requerida em diversos estudos como os relacionados a balanço hídrico, plantio direto, uso eficiente da água na agricultura, partição dos componentes de ET, relações hídricas das culturas e no teste dos modelos de balanço hídrico.

Usualmente E é medida em condições de solo nu usando lisímetros (WALKER, 1983). Em condições de solo cultivado, modelos como o de Ritchie (1972) são considerados adequados para estimar E, já que não se consegue sua medição separadamente de T usando lisímetros. O modelo de Ritchie (1972), constituiu um grande avanço na quantificação de E e T separadamente. A estimativa de E é obtida por meio da repartição da energia que conduz os dois processos em função do índice de área foliar, usando uma descrição matemática simples do processo evaporativo em duas fases distintas, a fase 1, “fase limitada pela energia”, e a fase 2, “fase de redução da evaporação”. Assim, como alternativa para medição de E em solo cultivado destacam-se os microlisímetros (BOAST; ROBERTSON, 1982; WALKER, 1983; VILLALOBOS; FERERES, 1990; DAAMEN et al., 1993;

EVETT; WARRICK; MATTHIAS, 1995).

Os microlisímetros (Figura 2.5) são constituídos de pequenos tubos preenchidos com solo de estrutura intacta, instalados ao nível do solo e pesados periodicamente para medição de E pela diferença de massa no período. Até o momento, alguns trabalhos foram realizados visando desenvolver microlisímetros para medir E em condições de solo nu ou cultivado, sendo os mais conhecidos os tipos apresentados por Boast e Robertson (1982), Allen (1990) e Evett, Warrick e Matthias (1995).

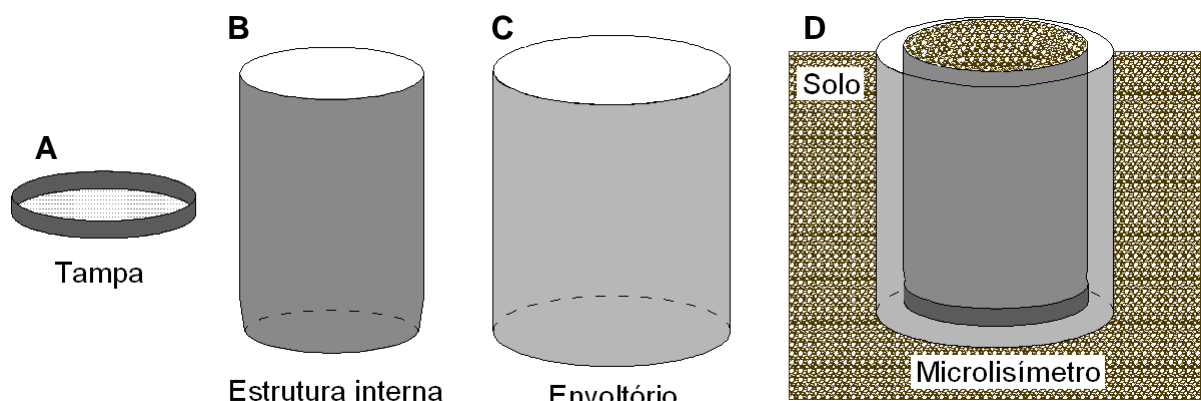


Figura 2.5 – Componentes de um microlisímetro, sendo a tampa para eliminar a drenagem (A), estrutura interna (B), envoltório (C) e ilustração do microlisímetro instalado no solo para medição da evaporação (D).

2.5 TRANSPIRAÇÃO

O processo transpiratório consiste na vaporização da água contida nos tecidos das plantas e na remoção desse vapor em direção à atmosfera (SINCLAIR, 1990; ALLEN et al., 1998; TAIZ; ZEIGER, 2004). Segundo Reichardt (1985), Sinclair (1990), Allen et al. (1998) e Taiz e Zeiger (2004), esse processo é governado por leis físicas, mas limitado por fenômenos biológicos.

Desta forma, a água que é evaporada nos tecidos da planta é posteriormente difundida para a atmosfera através dos estômatos. Os estômatos apresentam capacidade de regular sua abertura e fechamento por meio de um par de células epidérmicas especializadas que circundam o poro estomatal e são chamadas de células-guarda (TAIZ; ZEIGER, 2004).

As células-guarda são sensíveis a fatores como, intensidade e qualidade da luz, temperatura, umidade relativa e concentração intracelular de CO_2 , interpretando cada fator como um comando para abrir ou fechar o poro estomático. Assim, quando o potencial hídrico da planta aumenta (menos negativo), a água se movimenta para dentro da célula-guarda, causando aumento da pressão de turgor e aumento do volume da célula-guarda, provocando a abertura do estômato. Por outro lado, à medida que o potencial hídrico da planta diminui (mais negativo), a célula-guarda se torna menos túrgida, diminuindo assim o seu volume e fechando novamente o poro estomático (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Segundo Taiz e Zeiger (2004), a regulação estomática é importante para controlar a perda de água pela planta e também a taxa de absorção de CO_2 , necessária para a fotossíntese. Assim, para que haja entrada de CO_2 se faz necessária à abertura do estômato e, por consequência, ocorre a transpiração. Logo, quando a planta se encontra com suficiência hídrica os estômatos se abrem, ocorrendo as perdas de água por transpiração e a absorção de CO_2 . Sob restrição hídrica os estômatos se fecham para economizar água, mas a taxa fotossintética é reduzida devido à redução na absorção de CO_2 .

2.5.1 Fatores que influenciam a transpiração

O processo transpiratório se comporta de maneira diferenciada ao longo do ciclo da cultura devido à ação de diversos fatores (Figura 2.2). A demanda transpiratória varia em função do suprimento energético, do gradiente de pressão de vapor e do vento. Portanto, a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e vento, devem ser considerados quando se estuda T de plantas (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), a radiação solar consiste na fonte energética responsável pelo aquecimento da folha e das camadas de ar mais próximas à folha, fazendo com que a temperatura seja aumentada, disponibilizando mais energia para o processo transpiratório. Além disso, quanto mais seco o ar na camada limítrofe à folha, maior o déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar e, portanto, maior tende a ser T. Por fim, o vento aumenta T devido ao fato de carrear o

ar úmido que está próximo à folha e deixar o ar seco em seu lugar, renovando então o déficit de pressão de vapor. Levando-se em consideração somente as características da atmosfera, é de se esperar que os maiores valores de T sejam encontrados em condições de alta radiação solar e temperatura, baixa umidade relativa do ar e ventos fortes e constantes.

Além desses fatores, a quantidade de água no solo e a habilidade do solo em conduzir a água até as raízes são fatores que determinam a taxa transpiratória. A taxa transpiratória é também afetada pelas características da cultura, características do seu desenvolvimento, aspectos ambientais e pelas práticas de manejo (ALLEN et al., 1998).

2.5.2 Métodos para determinação da transpiração

A quantificação de T é requerida em diversos estudos como os relacionados ao balanço hídrico, uso eficiente da água na agricultura, partição dos componentes de ET , relações hídricas das culturas, estresse hídrico e estudos fisiológicos em geral.

Pode ser obtida usando o método do fluxo de seiva, modelos matemáticos e lisimetria. Nestes casos faz-se necessário o uso de instrumentação sofisticada ou a coleta de dados meteorológicos que podem não estar disponíveis para a região, fazendo com que se torne caro e trabalhoso a utilização destes métodos (SINCLAIR, 1990; ALLEN et al., 1998).

O uso de lisímetros de pesagem possibilita determinar T a partir de ET . Os valores de T podem ser determinados pela diferença entre ET e E , medindo-se ET por lisímetros e E por microlisímetros, ou seja:

$$T = ET - E \quad (2.1)$$

sendo T a transpiração, ET a evapotranspiração obtida usando lisímetros e E a evaporação obtida usando microlisímetros (todas as unidades em mm).

2.6 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A evapotranspiração de referência (ET_o), também denominada demanda evaporativa da atmosfera ou demanda da atmosfera, refere-se à quantidade de ET de uma superfície de referência, representada por um cultivo hipotético de vegetação rasteira, com altura constante de 12 cm, resistência superficial de 70 s m⁻¹ e albedo de 0,23. Portanto, a superfície de referência é similar a uma área extensa de grama verde, conduzida sem limitações hídricas, mantida com altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente o solo (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998).

Considerando-se que a água é sempre disponível, os fatores do solo e da planta não afetam ET_o, sendo os elementos climáticos os únicos que determinam ET_o. Logo, ET_o também pode ser considerada uma variável climática. Assim, ET_o obtida em diferentes locais e épocas pode ser facilmente comparada por se tratar da mesma superfície de referência (ALLEN et al., 1998).

2.6.1 Métodos para determinação da evapotranspiração de referência

Segundo Jensen, Burman e Allen (1990), a melhor forma de se medir ET_o é utilizando lisímetros de pesagem cultivados com grama nas condições padronizadas por Allen et al. (1998). No entanto, a utilização desses sistemas apresenta dificuldades que favorecem a utilização de métodos de estimativa que utilizam dados meteorológicos para o cálculo.

Segundo Jensen, Burman e Allen (1990), Smith (1991) e Allen et al. (1998) o método mais preciso de estimativa de ET_o é o chamado Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que estima ET_o na escala diária. Existem ainda outros métodos de estimativa de ET_o, no entanto, são tidos como menos usuais e de menor precisão (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

Um dos recentes avanços no estudo de ET_o foi a adaptação do método Penman-Monteith para a estimativa de ET_o na escala horária, resultando no

método ASCE Penman-Monteith horário (WALTER et al., 2000).

O método Penman-Monteith requer dados de radiação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para a estimativa de ETo, conforme a Equação 2.2, usada para estimar valores horários e diários de ETo (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998; WALTER et al., 2000):

$$ET_{OPM} \text{ ou } ET_{OPMH} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (2.2)$$

na qual ET_{OPM} é a evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith diário (mm dia^{-1}), ET_{OPMH} a evapotranspiração de referência estimada pelo método ASCE Penman-Monteith horário (mm hora^{-1}), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é a radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_n é a constante do numerador (Tabela 2.1), T é a temperatura média do ar medida a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento medida a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s é a tensão de saturação de vapor (kPa), e_a é a tensão parcial de vapor (kPa) e C_d é a constante do denominador (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Valores da constante do numerador (C_n) e constante do denominador (C_d), para utilização na Equação 2.2 em função do método de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_{OPM} ou ET_{OPMH}) e da radiação horária líquida na superfície (R_n).

Método de estimativa de ETo	C_n	C_d
ET_{OPM}	900	0,34
ET_{OPMH} com $R_n > 0$	37	0,24
ET_{OPMH} com $R_n \leq 0$	37	0,96

2.7 COEFICIENTE DE CULTIVO

2.7.1 Coeficiente de cultivo simples

A relação entre ET da cultura conduzida sem limitação hídrica e ETo resulta no coeficiente de cultivo (K_c), também denominado coeficiente de cultivo simples, conforme a Equação 2.3 (DOORENBOS; PRUITT, 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998):

$$K_c = \frac{ET}{ETo} \quad (2.3)$$

sendo K_c o coeficiente de cultivo simples (adimensional), ET a evapotranspiração da cultura sob condição padrão (mm dia^{-1}) e ETo a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

Segundo Jensen, Burman e Allen (1990), K_c reflete a habilidade que um cultivo tem em atender a demanda da atmosfera. Logo, K_c representa o comportamento da planta quando submetido a um determinado ambiente e este comportamento é unicamente dependente das características da planta, de tal forma que esse comportamento é semelhante para outros períodos e localidades (ALLEN et al., 1998).

Doorenbos e Pruitt (1977), Doorenbos e Kassam (1979), Jensen, Burman e Allen (1990) e Allen et al. (1998) afirmam que é possível estimar ET de um cultivo para outros períodos e localidades, através do uso de K_c determinado para esta cultura e de ETo estimada a partir de dados meteorológicos conforme a Equação 2.4:

$$ET = K_c \times ETo \quad (2.4)$$

na qual ET é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}), K_c é o coeficiente de cultivo simples (adimensional) e ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

A determinação de valores precisos de K_c é fundamental para as atividades em que é requerido, tais como manejo de irrigação, uso eficiente da água na agricultura, estudos fisiológicos e de balanço hídrico. Portanto, a forma mais precisa de se determinar K_c é relacionar ET da cultura medida por lisímetros de pesagem com ETo estimada pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

2.7.2 Coeficiente de cultivo dual

O conceito de coeficiente de cultivo dual foi introduzido por Allen et al. (1998), de tal forma que K_c pode ser dividido em dois componentes distintos, o coeficiente de evaporação (K_e), que é devido à evaporação do solo, e o coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), que é devido à transpiração da planta. Dessa forma, as Equações 2.3 e 2.4 podem ser reescritas como segue:

$$K_c = \frac{E + T}{ET_o} \quad (2.5)$$

e

$$ET = (K_e + K_{cb}) ET_o \quad (2.6)$$

em que K_c é o coeficiente de cultivo simples, E é a evaporação, T é a transpiração, ET_o é a evapotranspiração de referência, ET é a evapotranspiração, K_e é o coeficiente de evaporação e K_{cb} é o coeficiente de cultivo basal (todas as unidades em mm, exceto os coeficientes que são adimensionais).

Segundo Allen et al. (1998), é mais difícil trabalhar com K_c dual do que com K_c simples. Seu uso é indicado para operações em que são requeridas informações mais precisas a respeito da influência dos componentes E e T nos valores de K_c como, por exemplo, programas de irrigação de áreas individuais em escala diária.

2.7.2.1 Coeficiente de evaporação

A participação do componente E no processo de ET é dada por meio de K_e (ALLEN et al., 1998). Quando a superfície do solo se encontra úmida após irrigação ou chuva, o valor de K_e é máximo. À medida que a umidade na superfície do solo vai sendo reduzida devido ao processo evaporativo, o valor de K_e tende a ser reduzido. Desta forma, K_e pode ser obtido a partir da relação entre E e ET_o conforme Equação 2.7:

$$K_e = \frac{E}{ET_o} \quad (2.7) \text{ sendo } K_e \text{ o coeficiente de evaporação (adimensional), } E \text{ a}$$

evaporação (mm) e ETo a evapotranspiração de referência (mm).

2.7.2.2 Coeficiente de cultivo basal

Por definição, Kcb consiste na razão entre ET da cultura e ETo quando a superfície do solo está seca, mas a água não limita T que ocorre a taxa potencial (ALLEN et al., 1998). Como essa condição nunca acontece na prática, Kcb pode ser interpretado como a taxa de T da planta conduzida livre de déficit hídrico, quando submetida a uma determinada condição de ETo, conforme a Equação 2.8:

$$Kcb = \frac{T}{ETo} \quad (2.8)$$

na qual Kcb é o coeficiente de cultivo basal (adimensional), T é a transpiração da planta (mm) e ETo é a evapotranspiração de referência (mm).

3. ARTIGO A: EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO DE CAFEEIROS EM FASE DE FORMAÇÃO

RESUMO

A quantificação do consumo hídrico das culturas é fundamental para diversas aplicações na agricultura. Neste estudo, lisímetros de pesagem instalados em Londrina, PR, foram usados para determinar a evapotranspiração (ET) de cafeeiros da cultivar IAPAR 59, não irrigado e irrigado por aspersão e gotejamento, durante dois anos após a implantação da lavoura. O coeficiente de cultivo (Kc) foi obtido nos tratamentos irrigados a partir da razão entre ET e a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método Penman-Monteith. Os valores de ET e Kc dos tratamentos analisados variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera e evolução da área foliar. O tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou os maiores valores médios anuais de ET (3,1 e 3,4 mm dia⁻¹ para o primeiro e segundo ano, respectivamente), seguido do gotejamento (2,9 mm dia⁻¹ para o segundo ano) e do não irrigado (2,2 e 2,5 mm dia⁻¹ para o primeiro e segundo ano, respectivamente). O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (0,99 e 1,03 para o primeiro e segundo ano, respectivamente) e menor para o irrigado por gotejamento (0,92 para o segundo ano).

Palavras-chave: Lisímetro. Irrigação. *Coffea arabica*.

EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENTS OF COFFEE TREES DURING CROP FORMATION

ABSTRACT

Quantifying crop consumptive use is essential for many applications in agriculture. Evapotranspiration (ET) of coffee trees, cultivar IAPAR 59, under sprinkler and drip irrigation and no irrigation, were determined by weighing lysimeters in an experiment conducted in Londrina, PR, Brazil, during two years after crop installation. The crop coefficient (Kc) values were determined for the irrigated treatments by the ratio between ET and reference evapotranspiration (ET_o) estimated with the Penman-Monteith method. The values of ET and Kc were influenced by irrigation method, rainfall frequency, atmospheric demand and leaf area evolution. The sprinkler irrigated treatment presented the higher mean annual ET values (3.1 and 3.4 mm day⁻¹ for the 1st and 2nd year, respectively), followed by drip irrigation (2.9 mm day⁻¹ for the 2nd year) and no irrigation (2.2 and 2.5 mm day⁻¹ for the 1st and 2nd year, respectively). The mean annual Kc value was higher under sprinkler (0.99 and 1.03 for the 1st and 2nd year, respectively) and lower for drip irrigation (0.92 for the 2nd year).

Key-words: Lysimeter. Irrigation. *Coffea arabica*.

3.1. Introdução

A quantificação do consumo hídrico das culturas é fundamental para diversas aplicações na agricultura, tais como estudos de zoneamento agrícola, monitoramento agroclimático, estimativa de safras, manejo de irrigação e drenagem e estudos hidrológicos em geral.

O consumo de água de um cultivo pode ser expresso na forma de evapotranspiração (ET), que engloba a evaporação (E) e a transpiração (T) (ALLEN et al., 1998). Além de ET do cultivo de interesse, determina-se também a evapotranspiração de referência (ET_o), que corresponde à demanda evaporativa da atmosfera (ALLEN et al., 1998) e pode ser satisfatoriamente estimada com dados meteorológicos pelo método padrão Penman-Monteith (ALLEN, 1986; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

Da razão entre ET da cultura conduzida sob ótimas condições de manejo (inclusive hídrica) e ET_o resulta o coeficiente de cultivo (K_c) (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN et al., 1998), que reflete a habilidade de um cultivo em atender a demanda da atmosfera (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990) e pode ser usado para estimar ET para outros períodos e localidades. Tanto K_c como ET variam principalmente em função do tipo da cultura e do estágio fenológico. No estágio inicial de desenvolvimento ocorrem baixos valores, uma vez que a cultura cobre parcialmente o solo, sendo E praticamente o único componente de ET. Com o crescimento progressivo da área foliar, elevam-se as taxas de T, aumentando os valores de ET e K_c. Com a queda das folhas no período de senescência da cultura, há diminuição nas taxas de ET e K_c devido à redução de T, tornado novamente E o componente principal de ET.

Os valores de ET e K_c são também influenciados pela fertilidade do solo e ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas, uma vez que esses fatores afetam o desenvolvimento de área foliar (ALLEN et al., 1998). Outros fatores que influenciam ET e K_c são as condições meteorológicas que determinam ET_o, tais como a radiação solar, temperatura e, em menor proporção, a umidade relativa do ar e o vento (ALLEN et al., 1998). Finalmente, chuva e irrigação afetam significativamente ET e K_c, devido ao aumento da taxa de E nos períodos imediatamente após o molhamento da superfície do solo, principalmente em

condições de cobertura parcial do solo (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990).

Determinações precisas de ET podem ser obtidas em equipamentos denominados lisímetros, sendo os mais precisos os que usam sistema de pesagem, com possibilidade de se obter medidas em períodos menores que um dia (HOWELL; McCORMICK; PHENE, 1985). No entanto, Pereira, Villa Nova e Sediya (1997) apontam que a obtenção de dados de lisímetros é extremamente difícil e onerosa, justificando seu uso apenas em condições experimentais, após a calibração do sistema nas condições do estudo para que se obtenham dados confiáveis.

Diversos estudos visando medir ou estimar o consumo de água de espécies cultivadas já foram realizados nas mais variadas condições ambientais, tais como para arroz e girassol (TYAGI; SHARMA; LUTHRA, 2000), trigo e milho (KANG et al., 2003) e algumas culturas hortícolas (ORGAZ et al., 2005). Essas pesquisas complementam as sínteses de resultados sobre requerimento hídrico de cultivos publicadas por Doorenbos e Pruitt (1977), Doorenbos e Kassam (1979), Wright (1982) e Allen et al. (1998).

Até o momento, são escassos os trabalhos sobre consumo hídrico do cafeeiro disponíveis na literatura. Em geral, esses trabalhos se baseiam em estimativas indiretas, o que limita a aplicação dos resultados em situações diferentes das que foram conduzidos (CARR, 2001).

Clowes (1984) considerou K_c igual a 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro irrigado por gotejamento. Gutierrez e Meinzer (1994), utilizando o método da razão de Bowen, obtiveram K_c para cafeeiro irrigado por gotejamento de 0,58 para plantas com aproximadamente 12 meses e 0,75 a 0,79 para plantas de 24 a 48 meses.

Por dedução teórica, Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) recomendaram valores de K_c de 0,6 a 0,8 para plantas de até 12 meses, 0,8 a 1 para plantas de 12 a 36 meses e de 1 a 1,2 para plantas com mais de 36 meses. Para lavouras de café com 2 a 3 m de altura, conduzidas sem cobertura nas entrelinhas em clima subúmido, Allen et al. (1998) recomendam valores de K_c inicial, médio e final de 0,9, 0,95 e 0,95, respectivamente.

Arruda et al. (2000), por monitoramento de água no solo, obtiveram K_c para cafeeiro irrigado por aspersão convencional de 0,73 a 0,75 nos primeiros anos, e de 0,87 a 0,93 aos sete e oito anos. Utilizando lisímetros de percolação, Antunes et al. (2000) determinaram K_c de 0,35 para o período mais seco e 0,4 para

o mais chuvoso em cafeeiro irrigado por gotejamento em fase de formação (10 a 20 meses de transplântio).

Utilizando lisímetros de pesagem, Righi (2004) determinou valores de K_c entre 1,04 e 1,3 para cafeeiro de 12 a 24 meses, adensado (3,5 x 0,9 m), com vegetação nas entrelinhas e irrigado por gotejamento. Marin et al. (2005), nas mesmas condições de Righi (2004), porém utilizando o método da razão de Bowen, determinaram K_c de plantas com cinco anos de idade e obtiveram K_c igual a 1.

O presente trabalho teve como objetivos determinar ET e K_c de cafeeiros conduzidos sob irrigação por aspersão e gotejamento, e ET de cafeeiros conduzidos sem irrigação, durante a fase de formação da lavoura, em Londrina, PR.

3.2. Material e Métodos

O estudo foi conduzido no Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), em Londrina, PR (latitude 23°18'S, longitude 51°09'O e altitude de 585 m), durante o período de 07/10/2002 a 31/08/2004. O solo é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico, segundo Embrapa (1999), e o clima é subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen, com média anual de temperatura de 21,5 °C e precipitação que varia de 1.400 a 1.600 mm anuais (IAPAR, 1994).

Foram instalados cinco lisímetros de pesagem de 1,9 m de comprimento, 1,4 m de largura (2,66 m²) e 1,3 m de profundidade, conforme descrito por Faria, Campeche e Chibana (2006). Cafeeiros (*Coffea arabica* L.) da cultivar IAPAR 59 foram plantados em outubro de 2002, no espaçamento 2 x 1,6 m, com duas plantas por cova (0,3 m entre plantas), nos lisímetros e na bordadura, totalizando 115,2 m² (14,4 x 8 m). A área era circundada por grama e localizada ao lado das Estações Meteorológicas do IAPAR e do Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), conforme apresentado nas Figuras 3.1 e 3.2.

A direção predominante dos ventos na área experimental ocorre no sentido leste-oeste (IAPAR, 1994). Assim, foi possível projetar a área experimental em dimensões reduzidas devido à presença de uma extensa área cultivada com cafeeiros nas direções nordeste, leste e sudeste que serviam como bordadura.

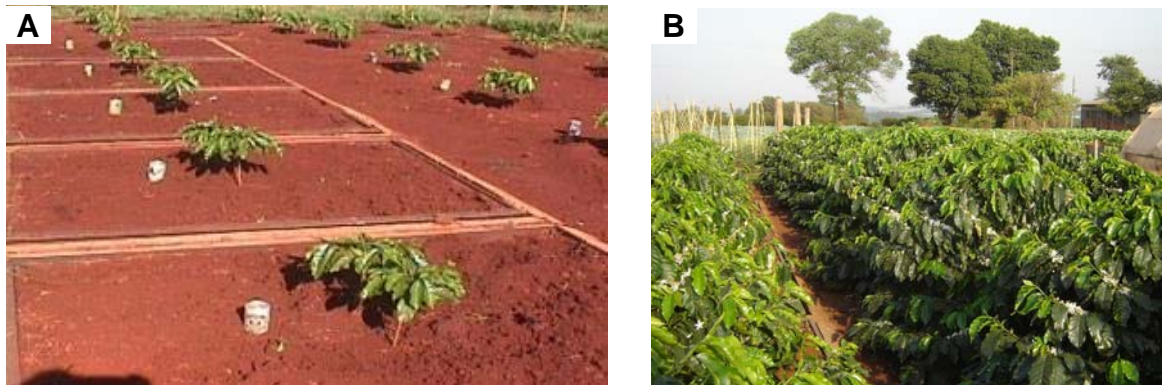


Figura 3.1. Área experimental com cafeeiros cultivados nos lisímetros e na bordadura em 20/11/2002 (A) e 27/08/2004 (B).

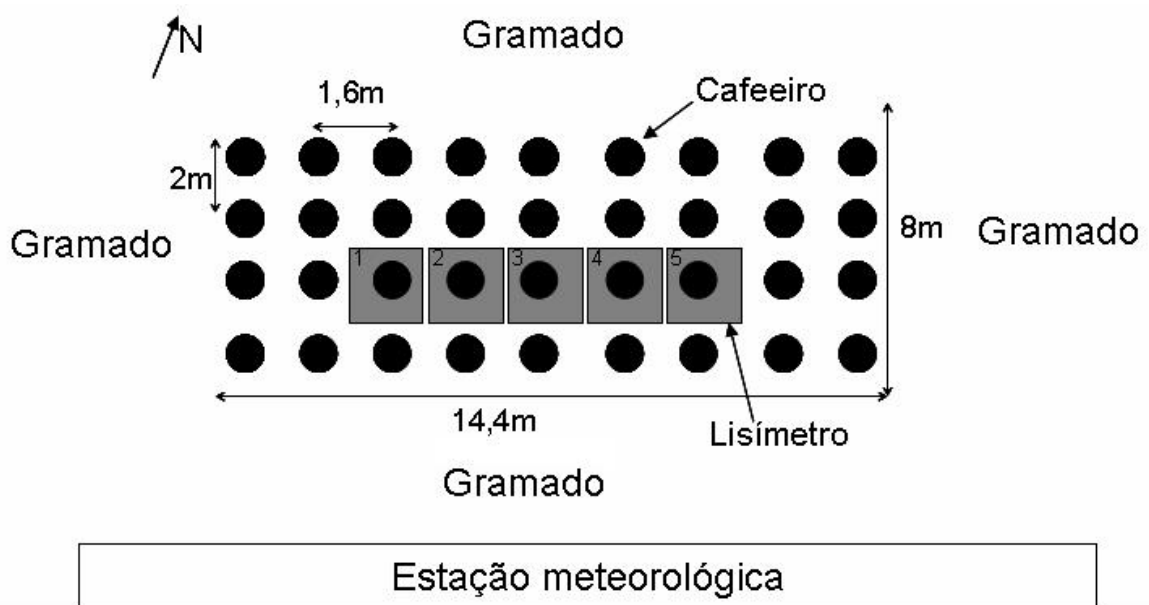


Figura 3.2. Croqui da área experimental, em que os lisímetros 1 e 2 foram irrigados por aspersão, lisímetros 3 e 4 não foram irrigados e lisímetro 5 foi irrigado por gotejamento.

Os lisímetros estão assentados sobre um quadro metálico acoplado a um conjunto de alavancas para redução de massa em aproximadamente 45 vezes a massa total que é de aproximadamente 6 ton (Figura 3.3A). Possuem sistema de drenagem com reservatórios de armazenamento de água constituídos de dois tubos de PVC, colocados sob os lisímetros, que possibilitam o armazenamento da água percolada pelo perfil do solo (Figura 3.3B). A água de drenagem é contabilizada pelo sistema de pesagem até a abertura dos registros. A variação de massa de cada lisímetro é medida por uma única célula de carga (detalhe da Figura 3.3B), que emite sinais elétricos com sensibilidade de $2 \pm 10 \text{ mV V}^{-1}$ e trabalha com acuracidade de 0,02% do fundo de escala. O sinal elétrico de cada célula de carga é

captado por um sistema de aquisição de dados constituído de um multiplexador (AM416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, USA) e de uma unidade de armazenamento de dados (CR10X, Campbell Scientific, Logan, USA) para posteriormente ser transferido para um módulo de memória ou computador (Figura 3.3C). A conversão dos sinais elétricos para massa do lisímetro foi realizada por equações de regressão previamente calibradas por Faria, Campeche e Chibana (2006) e o cálculo da lâmina de água foi realizado pela Equação 3.1:

$$L = \frac{M}{A} \quad (3.1)$$

na qual L é a lâmina de água (mm), M é a massa de água (Kg) e A é a área de superfície do lisímetro (m²). Não houve nenhuma correção nos dados de M ou L devido à diferença entre a área da superfície do lisímetro (2,66 m²) e a área de terreno ocupada pela cova de plantas (3,2 m²), por entender que a superfície do lisímetro representou quase a totalidade (83%) da área ocupada pelas duas plantas da cova.



Figura 3.3. Componentes dos lisímetros. Balança com sistema de redução de massa e coxim no detalhe (A), sistema de drenagem e célula de carga no detalhe (B) e sistema de aquisição e armazenamento de dados (C).

Foram irrigadas as plantas de dois lisímetros por aspersão e um por gotejamento (iniciado em 04/08/2003), mantendo-se sem irrigação outros dois lisímetros (Figura 3.2). As irrigações foram realizadas com frequência de uma a duas vezes por semana, visando repor a umidade do solo ao nível próximo da condição de capacidade de campo (CC). Atribuiu-se o valor de 150 mm à lâmina de armazenamento de água na CC, que correspondeu à massa do lisímetro, descontada a drenagem e a evaporação, depois de quatro dias de ocorrência de chuva suficiente para saturar o solo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005). O armazenamento no ponto de murcha permanente (PMP) foi obtido a partir da caracterização física do solo do local (FARIA; CARAMORI, 1986), que mostrou valor de água disponível igual a 10% vol.. Portanto, para a profundidade de 1,3 m do

lisímetro utilizado, o valor de capacidade de água disponível (CAD) foi igual a 130 mm e o armazenamento no PMP foi assumido como sendo correspondente à massa do lisímetro na CC descontados 130 mm (20 mm).

A irrigação por aspersão foi simulada aplicando-se manualmente a água em toda a superfície dos lisímetros utilizando-se um regador plástico, enquanto que a irrigação por gotejamento foi realizada em um raio de aproximadamente 0,2 m do tronco do cafeeiro usando um tubo gotejador de formato circular, alimentado por um reservatório elevado suprido manualmente de água. A irrigação por gotejamento foi iniciada em 04/08/2003, sendo que até essa data os dados do lisímetro correspondente foram contabilizados em favor do tratamento não irrigado.

Os valores de ET foram determinados pela contabilidade das entradas, saídas e armazenamento de água nos lisímetros de acordo com a Equação 3.2:

$$ET = P + I \pm ES - D \pm \Delta A \quad (3.2)$$

em que ET é a evapotranspiração, P é a precipitação, I é a lâmina de água irrigada, ES é o escoamento superficial, D é a drenagem e ΔA é a variação de armazenamento de água nos lisímetros (todas unidades em mm). O valor de ES foi considerado nulo devido à borda elevada dos lisímetros (cerca de 3 cm) e a precipitação foi medida na estação meteorológica do Iapar.

Os valores de Kc dos tratamentos irrigado por aspersão e gotejamento foram determinados de acordo com a Equação 3.3:

$$Kc = \frac{ET}{ETo} \quad (3.3)$$

sendo Kc o coeficiente de cultivo (adimensional), ET a evapotranspiração do cultivo (mm dia^{-1}) e ETo a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}). Valores diários de ETo foram calculados no programa REF-ET (ALLEN, 2000) pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) usando dados diários da estação meteorológica do Simepar. O cálculo de ETo horária foi realizado pelo método ASCE Penman-Monteith horária (WALTER et al., 2000) utilizando dados horários da estação meteorológica do Simepar.

Os valores de ET dos diferentes tratamentos, ETo e Kc foram agrupados em médias referentes às estações do ano. Os valores médios de ETo correspondem à média de todos os valores observados no período, enquanto que as médias de ET foram obtidas com um número menor de dados, considerando que

houve falhas de medidas. Consequentemente, Kc foi determinado somente nos dias em que houve medidas de ET e sua média foi resultante de tais determinações. Todavia, os valores de ET e Kc obtidos correspondem à média de mais de 50% da duração do período observado.

Periodicamente foi avaliada a altura de plantas e calculado o índice de área foliar (IAF) das duas plantas de cada lisímetro. Determinou-se a altura medindo-se com uma trena o comprimento do ramo ortotrópico a partir do nível do solo. O valor de IAF foi obtido pela razão entre a área de folhas e área do terreno ocupada pelas plantas analisadas. A área de folhas foi estimada pelo produto entre o número de folhas e a área média de dez folhas estimada pela Equação 3.4, que foi calibrada previamente por Flumignan, Adami e Faria (2007) utilizando-se uma amostra de 80 folhas da mesma cultivar obtida em uma lavoura vizinha. Na calibração, o resultado do produto entre o comprimento e a largura das folhas, juntamente com a área foliar medida pelo integrador de área foliar LI-COR (modelo 3100), foram submetidos à regressão linear para obter a seguinte relação ($R^2 = 0,99$):

$$AF = 0,6751(C \times L) + 0,3533 \quad (3.4)$$

sendo que AF é a área da folha (cm^2), C é o comprimento da folha (cm) e L a largura da folha (cm).

O manejo da cultura foi realizado segundo recomendações do lapa. O controle de plantas daninhas, inclusive nas entrelinhas, pragas e doenças, assim como a aplicação de fertilizantes e a correção da acidez do solo, foram realizados sempre que necessário.

3.3. Resultados e Discussão

Do início ao fim do experimento as plantas cresceram de 0,2 m até cerca de 1,1 m de altura e de 0,02 à aproximadamente 5 de IAF, com maiores incrementos no segundo ano (Figura 3.4). As taxas de crescimento em altura se diferenciaram apenas no período entre maio e agosto de 2004, quando o cafeeiro irrigado por gotejamento cresceu apenas 0,008 m, enquanto as plantas irrigadas por aspersão e não irrigadas cresceram 0,072 e 0,064 m, respectivamente (Figura 3.4A).

Já no período entre fevereiro e agosto de 2004, o cafeeiro irrigado por gotejamento foi o que apresentou maior crescimento de área foliar, aumentando IAF de 2,19 para 5,43, quando comparado aos cafeeiros irrigado por aspersão e não irrigado que cresceram IAF de 2,2 para 4,65 e 5, respectivamente (Figura 3.4B).

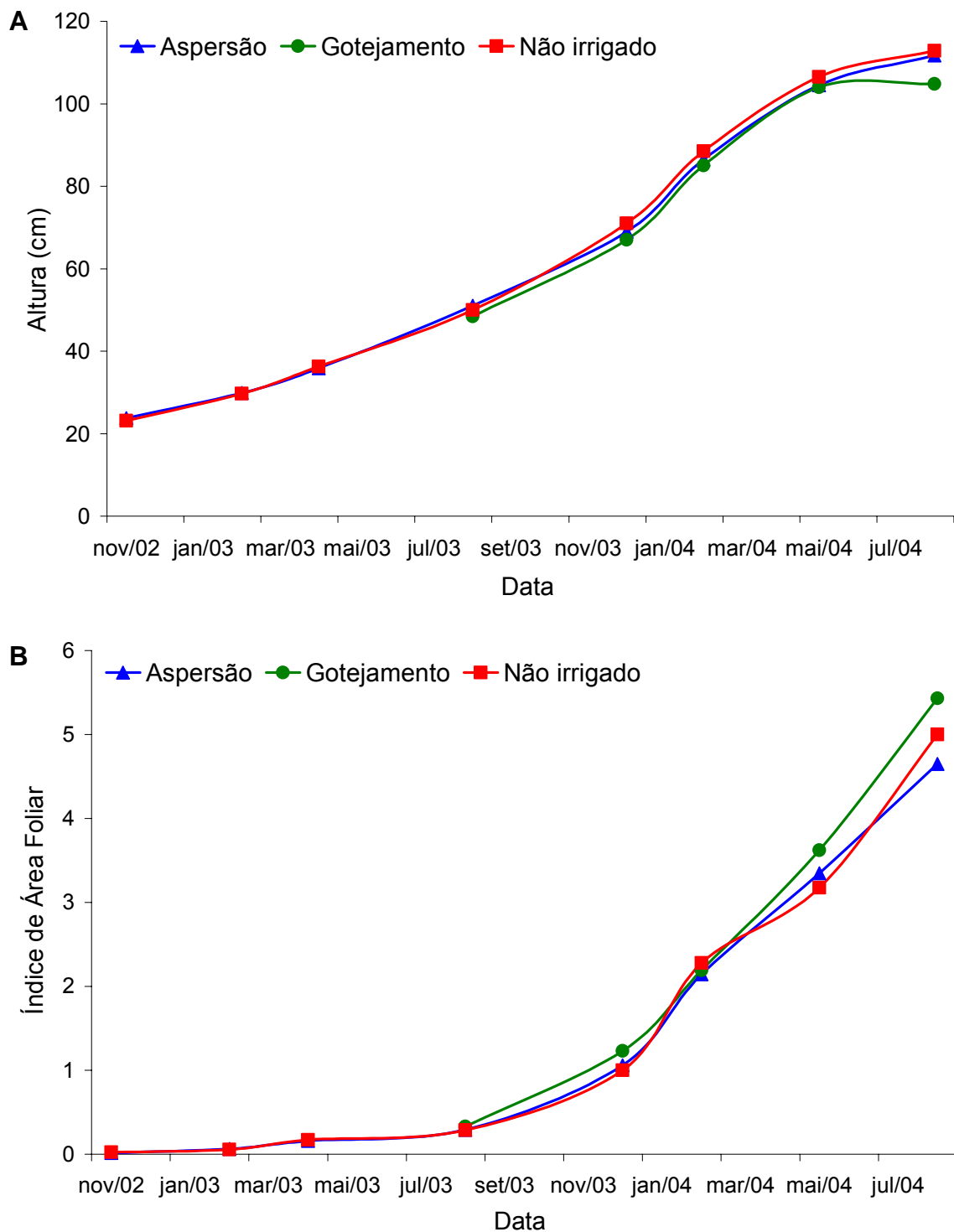


Figura 3.4. Altura (A) e índice de área foliar (B) de cafeeiro irrigado por aspersão, gotejamento e não irrigado na fase de formação em Londrina, PR.

O crescimento semelhante em altura e IAF durante o período analisado pode ser atribuído às condições de suprimento hídrico satisfatório (Figura 3.5), mesmo no tratamento não irrigado, que esteve com umidade do solo acima de 50% da fração de água disponível durante todo o período estudado devido à ocorrência de chuvas, enquanto que o tratamento sob aspersão foi mantido com umidade do solo próxima ou acima da CC pela irrigação e chuva. O tratamento irrigado por gotejamento esteve com umidade do solo satisfatória durante o período em que não foi irrigado (07/10/2002 a 04/08/2003), devido à ocorrência de chuvas, e durante 04/08/2003 a 31/08/2004, quando a irrigação e chuva mantiveram a umidade do solo próxima ou acima da CC.

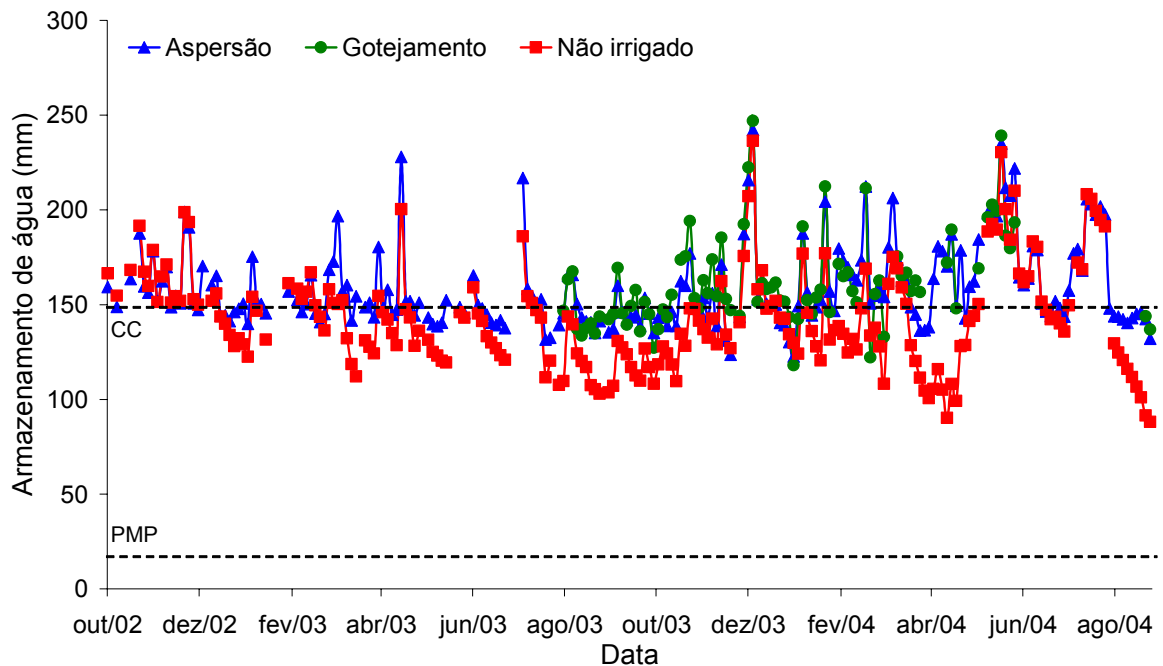


Figura 3.5. Variação do armazenamento mínimo diário de água no perfil do solo determinado com o uso de lisímetros de pesagem na fase de formação dos cafeeiros em Londrina, PR.

Os valores de ET nos três tratamentos seguiram a variação da E_{To} durante o período analisado (Figura 3.6A), com maiores valores de setembro a abril e menores de maio a agosto. O tratamento sob aspersão foi o que apresentou taxas mais elevadas de ET, sendo próximas ou superiores a E_{To} durante quase todo o período experimental. Valores intermediários de ET ocorreram no tratamento sob gotejamento e as menores taxas foram observadas no tratamento não irrigado. Isso pode ser explicado pela relação direta entre E e a umidade na camada superficial do

solo, que foi maior no tratamento irrigado por aspersão, intermediário no gotejamento e menor no tratamento sem irrigação.

A demanda atmosférica média anual, expressa por ETo, foi similar entre o primeiro e segundo ano (3,2 e 3,3 mm dia⁻¹, respectivamente), com maiores valores durante a primavera e verão (3,5 a 4,2 mm dia⁻¹), intermediários no outono (2,8 a 3,2 mm dia⁻¹) e menores no inverno (2,2 a 2,4 mm dia⁻¹) (Tabela 3.1). O tratamento irrigado por gotejamento apresentou ET média anual de 2,9 mm dia⁻¹, obtida somente no segundo ano, sendo 15% inferior ao tratamento com aspersão e 15% superior ao tratamento não irrigado. A média de ET aumentou do primeiro para o segundo ano no tratamento com aspersão, de 3,1 para 3,4 mm dia⁻¹, e no tratamento não irrigado, de 2,2 para 2,5 mm dia⁻¹, devido ao crescimento da área foliar (Figura 3.4B). Conseqüentemente, o consumo hídrico médio do tratamento irrigado por aspersão foi de 43% e 36% mais alto que o tratamento não irrigado para o primeiro e segundo ano, respectivamente. Sob aspersão, gotejamento e sem irrigação, os maiores valores de ET ocorreram na primavera e verão (3,1 a 4,7 mm dia⁻¹, 2,9 a 4,2 mm dia⁻¹ e 2,3 a 3,6 mm dia⁻¹, respectivamente), foram intermediários no outono (3,2 a 3,4 mm dia⁻¹, 2,9 mm dia⁻¹ e 1,8 a 2,6 mm dia⁻¹, respectivamente) e menores no inverno (1,8 a 2,4 mm dia⁻¹, 1,7 mm dia⁻¹ e 1,2 a 1,4 mm dia⁻¹, respectivamente).

Na primavera do primeiro ano, as médias de ET dos tratamentos irrigado por aspersão e não irrigado foram muito próximas devido ao grande volume de chuva (284 mm), que manteve a umidade do solo de ambos os tratamentos próxima da CC (Figura 3.5). No verão ocorreu fenômeno semelhante, porém devido a maior quantidade de eventos de irrigação os tratamentos se diferenciaram ligeiramente devido à maior quantidade de E no tratamento irrigado por aspersão. No outono e inverno, ocorreram poucas chuvas e os tratamentos se diferenciaram devido ao efeito da irrigação.

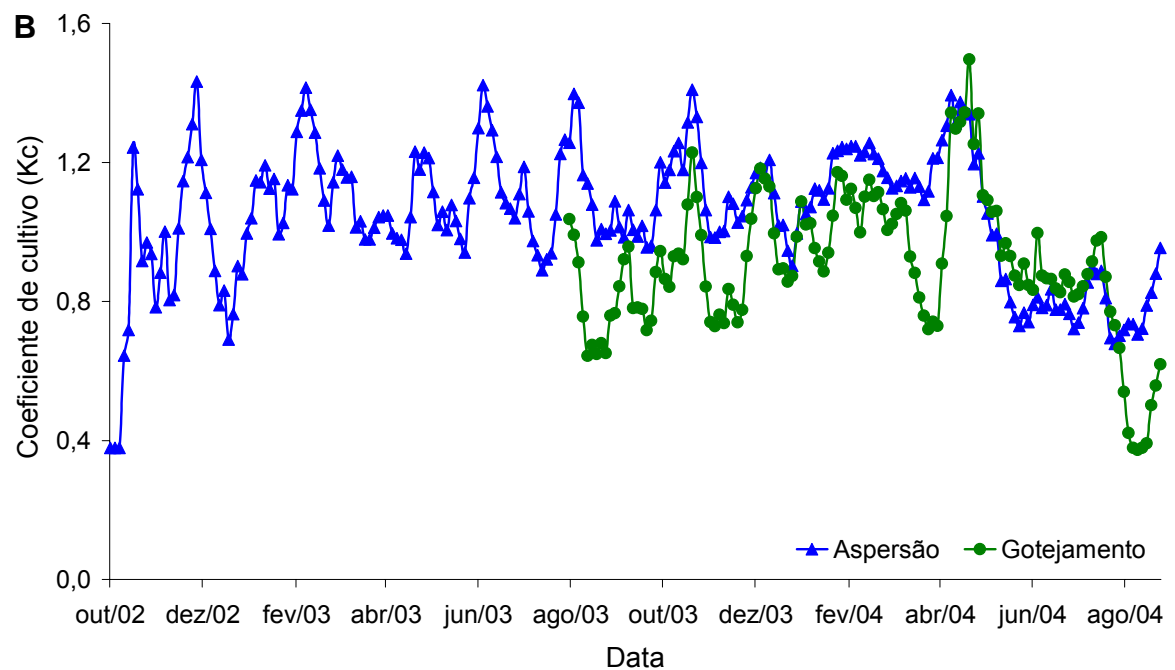
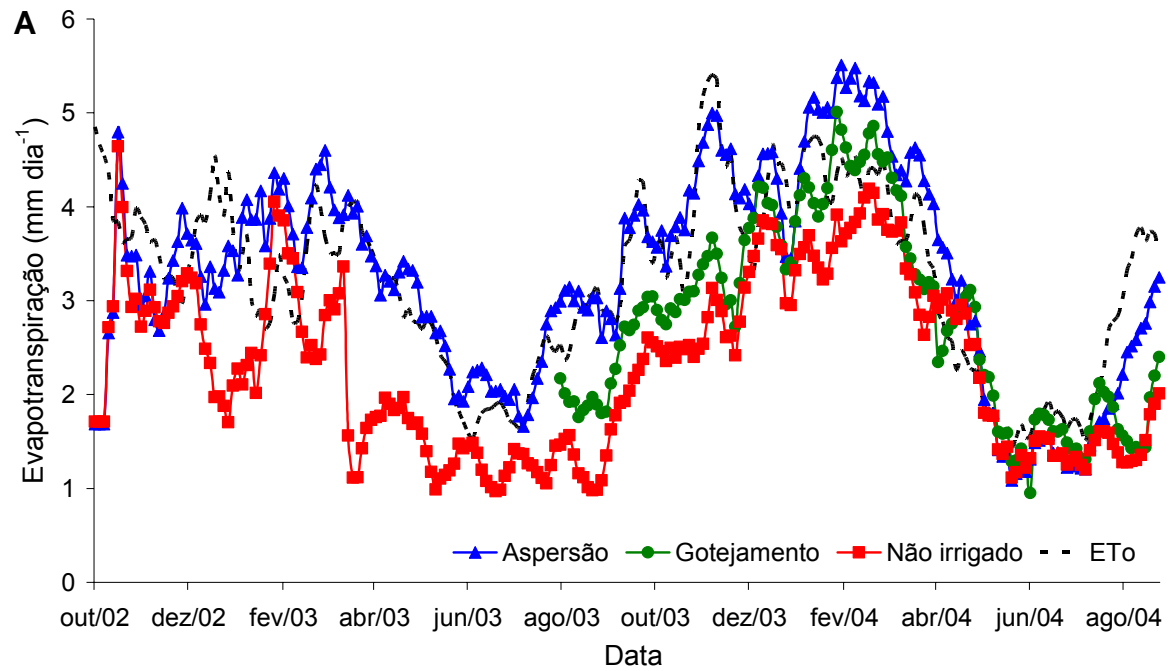


Figura 3.6. Evapotranspiração de referência (ET_o) e evapotranspiração (A), e coeficientes de cultivo (B) de cafeeiros sob aspersão, gotejamento e não irrigado, obtidos por média móvel de 15 dias, durante a fase de formação da lavoura em Londrina, PR.

Tabela 3.1. Médias de evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração (ET) e coeficientes de cultivo (K_c) de cafeeiros irrigados por aspersão (A), gotejamento (G) e não irrigado (NI), durante estações do ano agrícola na fase de formação da lavoura em Londrina, PR.

Ano agrícola	Estação	ET _o	ET			K _c	
			A	G	NI	A	G
			(mm dia ⁻¹)				
2002 / 03 (1º ano)	Primavera	3,8	3,1	-	3,0	0,69	-
	Verão	3,5	3,7	-	2,7	1,08	-
	Outono	3,2	3,4	-	1,8	1,06	-
	Inverno	2,2	2,4	-	1,2	1,14	-
	Média	3,2	3,1	-	2,2	0,99	-
2003 / 04 (2º ano)	Primavera	3,9	3,9	2,9	2,3	1,08	0,85
	Verão	4,2	4,7	4,2	3,6	1,15	1,05
	Outono	2,8	3,2	2,9	2,6	1,12	1,07
	Inverno	2,4	1,8	1,7	1,4	0,79	0,74
	Média	3,3	3,4	2,9	2,5	1,03	0,92

A média anual de K_c do tratamento irrigado por aspersão foi igual a 0,99 e 1,03, no primeiro e segundo ano, respectivamente, e 0,92 para o tratamento irrigado por gotejamento no segundo ano. Da mesma forma que obtido para ET, os valores de K_c variaram durante o ano e foram mais elevados no tratamento com aspersão e menores no gotejamento (Figura 3.6B, Tabela 3.1). Em condição de irrigação por aspersão, as médias de K_c no primeiro ano aumentaram de 0,69 na primavera para 1,08 no verão, 1,06 no outono e 1,14 no inverno. No segundo ano, os valores de K_c continuaram acima de 1 no tratamento sob aspersão, 1,08 na primavera, 1,15 no verão e 1,12 no outono, decrescendo para 0,79 no inverno. Comportamento similar ocorreu no tratamento irrigado por gotejamento, determinado durante o segundo ano, em que K_c aumentou de 0,85 na primavera para 1,05 no verão e 1,07 no outono, decrescendo para 0,74 no inverno.

Os valores de K_c determinados no primeiro ano foram devidos praticamente às perdas por E, uma vez que a cultura cobria pequena porção do terreno. O aumento das médias de K_c nos dois tratamentos irrigados durante o segundo ano está relacionado, especialmente, à evolução do IAF, que aumentou continuamente nesse período, aumentando T por consequência (Figura 3.4B). Apesar da continuidade de crescimento da área foliar, durante o inverno os valores de K_c de ambos os tratamentos irrigados apresentaram queda, que pode ser atribuída à menor atividade fisiológica da planta durante essa estação, considerada como fase de dormência do cafeeiro (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Já a diferença

dos valores de K_c no tratamento sob aspersão, em relação ao gotejamento, pode ser atribuída à maior quantidade de E no tratamento irrigado por aspersão (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990).

Os valores de K_c determinados no presente trabalho para aspersão (0,99 e 1,03, para o primeiro e segundo ano, respectivamente), foram maiores que os sugeridos por Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) para população de plantas semelhante no primeiro ano (0,6 a 0,8) e próximos dos sugeridos no segundo ano (0,8 a 1). Foram maiores também em relação aos apresentados por Arruda et al. (2000) (0,73 a 0,75 nos primeiros anos). A dedução teórica de Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) e o método de monitoramento de água no solo usado por Arruda et al. (2000) podem incluir simplificações que levaram os autores a subestimar os valores de K_c , uma vez que a lisimetria de pesagem utilizada neste trabalho apresenta alta precisão de medida (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Para as plantas sob gotejamento, o valor de K_c sugerido por Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) para o segundo ano, concorda com o valor encontrado neste trabalho (0,92). Ainda para gotejamento, o valor de K_c obtido por Gutierrez e Meinzer (1994) para plantas com aproximadamente 12 meses (0,58) foi menor que o encontrado neste trabalho para plantas de idade semelhante (0,85), correspondente à média da primavera do segundo ano (Tabela 3.1).

Além de apresentar valores de K_c para cafeeiro sob gotejamento menores que os observados neste trabalho, Clowes (1984) recomendou K_c único (0,6) para todas as fases fenológicas, o que foi comprovado ser incorreto pelos resultados obtidos no presente estudo, uma vez que os valores de K_c variaram durante o desenvolvimento fenológico da cultura, tanto na aspersão como no gotejamento (Figura 3.6B, Tabela 3.1). Antunes et al. (2000) também determinaram valores inferiores de K_c (0,35 e 0,4 para o período mais seco e mais chuvoso, respectivamente) em cafeeiros irrigados por gotejamento de 10 a 20 meses, comparados com os obtidos neste trabalho (0,74 a 1,07).

Também sob gotejamento, Righi (2004) determinou valores superiores de K_c (1,04 a 1,3) para cafeeiros de 12 a 24 meses, comparados com os obtidos para condições semelhantes no presente trabalho (0,74 a 1,07). A diferença pode ser atribuída à manutenção da cobertura vegetal na entrelinha do cafeeiro no experimento de Righi (2004), o que aumentou substancialmente T_e ,

consequentemente, K_c .

Além do crescimento da área foliar e da variação da demanda atmosférica, as diferenças nas médias de ET e K_c dos tratamentos foram decorrentes da frequência de molhamento e características da distribuição de água de irrigação, concordando com Jensen, Burman e Allen (1990). Para exemplificar como a irrigação influencia o consumo hídrico, na Figura 3.7 apresenta-se o monitoramento diário nos tratamentos sob aspersão, gotejamento e não irrigado em um dia de primavera, quando os cafeeiros apresentavam IAF médio de 0,46.

A variação positiva na massa do lisímetro (Figura 3.7A) foi resultado da irrigação de 15 mm, entre 13 e 14 h no tratamento com aspersão e entre 13 e 15 h no tratamento com gotejamento. No período subsequente à irrigação, ocorreu maior decréscimo de massa no lisímetro sob aspersão e intermediário no lisímetro sob gotejamento, em relação ao não irrigado, devido ao aumento de E nos tratamentos irrigados.

Antes da irrigação, o tratamento irrigado por aspersão apresentou taxas de ET mais altas que os outros tratamentos porque a superfície do solo estava mais úmida devido à irrigação realizada três dias antes (Figura 3.7B). Após a irrigação, as taxas horárias de ET no tratamento irrigado por aspersão foram mais elevadas que ETo. Por outro lado, o tratamento irrigado por gotejamento apresentou ligeiro aumento de ET, mas que pouco diferiu das taxas do tratamento não irrigado.

Ao final do dia, ETo foi igual a 4,97 mm e ET foi 4,9, 2,34 e 1,51 mm, para os tratamentos sob aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente (Figura 3.7C). Nessa data os valores de K_c foram 0,99 e 0,47 para os tratamentos com aspersão e gotejamento, respectivamente.

As elevadas taxas de ET no tratamento sob aspersão podem ser atribuídas, principalmente, ao aumento de E causado pelo molhamento de toda a superfície do solo, já que IAF era pequeno (Figura 3.4B). Assim, a irrigação por aspersão resultou em baixa resistência ao fluxo evaporativo da água recém-aplicada na superfície do solo e da folhagem, aumentando E, e em baixa resistência estomática, aumentando T, porém em menor proporção devido à baixa cobertura do solo. No tratamento irrigado por gotejamento, as taxas de ET foram menores, porque E foi menor devido a melhor eficiência de aplicação de água deste método. No tratamento não irrigado, a superfície do solo seca e a pequena área foliar resultaram em baixos valores de E e T, respectivamente, conforme detectado pelo pequeno

decréscimo de massa no lisímetro durante o dia (Figura 3.7A).

De maneira geral, o consumo hídrico foi mais acentuado durante as horas de maior disponibilidade energética (Figura 3.7B). Ainda na Figura 3.7, as perdas de massa durante o período noturno podem ser atribuídas à ET produzida pela energia armazenada no sistema e ao fator aerodinâmico, enquanto que os ganhos de massa podem ser devidos ao orvalho. Também a imprecisão do sistema de pesagem dos lisímetros, que é de 0,1 mm, pode ter sido responsável pelas oscilações de massa.

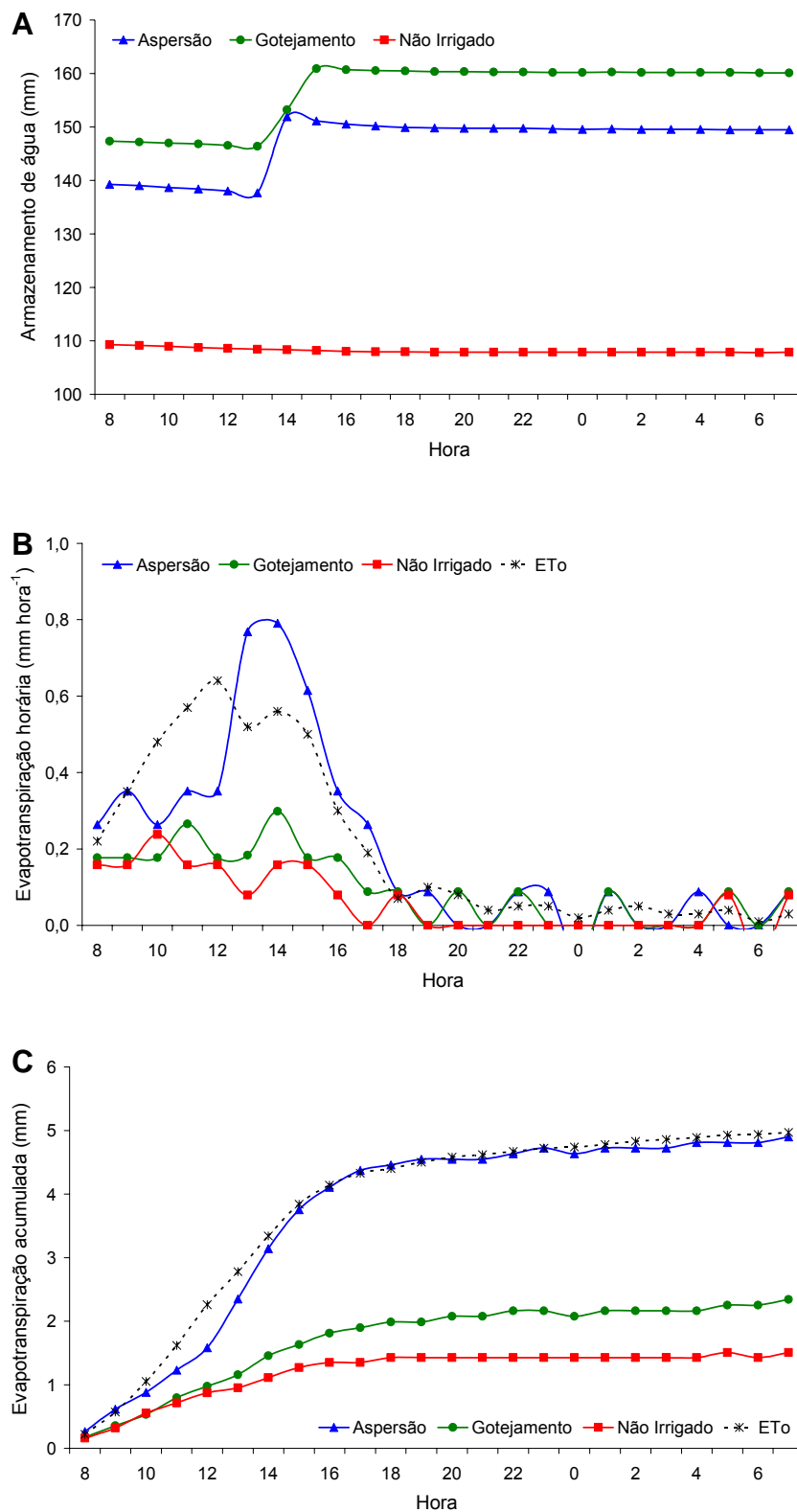


Figura 3.7. Armazenamento de água no lisímetro (A), evapotranspiração horária (B) e evapotranspiração acumulada (C) de cafeeiro em fase de formação irrigado por aspersão, gotejamento, não irrigado e evapotranspiração de referência (ETo), durante o dia 22/09/2003, quando foi aplicada lâmina de irrigação igual a 15 mm em Londrina, PR.

O consumo hídrico nos dias subsequentes à irrigação foi decrescente à medida que houve o secamento da superfície do solo nos tratamentos irrigados (Figura 3.8). O valor de K_c do tratamento sob aspersão foi 0,65 no dia anterior à irrigação, aumentou para 0,99 no dia da irrigação e 1,09 no dia seguinte, devido à manutenção da umidade na superfície do solo, e decresceu para 0,67 no segundo dia após a irrigação, por causa da perda de umidade na camada superficial do solo em decorrência de E . O tratamento sob gotejamento apresentou taxas intermediárias de ET durante o período, ligeiramente superiores ao tratamento não irrigado. Sob gotejamento, o valor de K_c foi 0,38 no dia anterior à irrigação, aumentou para 0,47 no dia da irrigação, decresceu para 0,43 no dia seguinte e para 0,35 no segundo dia após a irrigação. Já o tratamento não irrigado foi o que apresentou as menores taxas de ET devido a menor disponibilidade hídrica na camada superficial do solo.

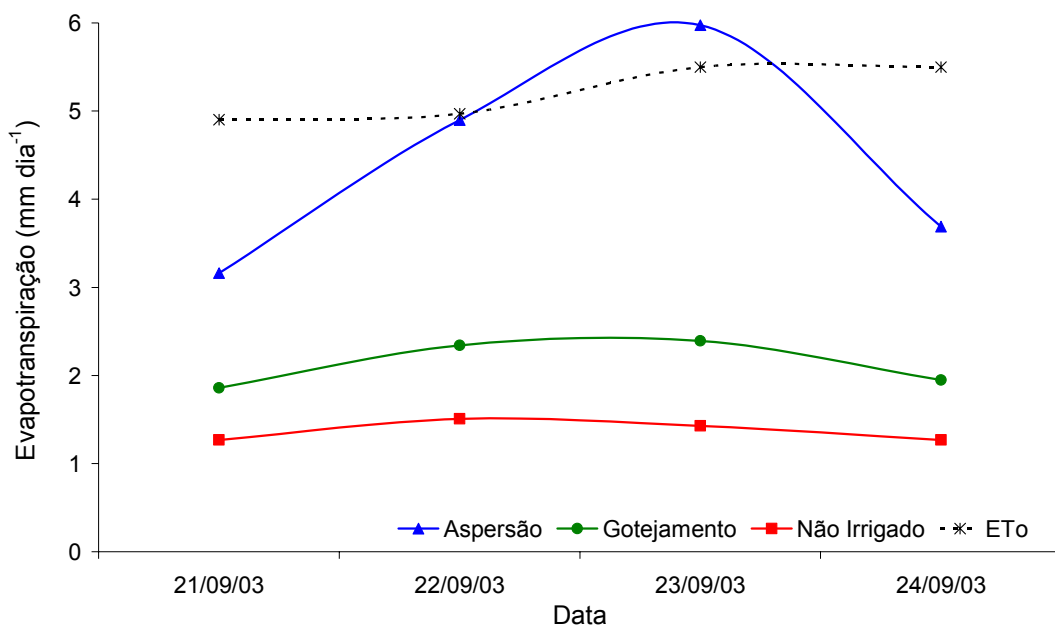


Figura 3.8. Curso diário da evapotranspiração de cafeeiros em fase de formação irrigados por aspersão, gotejamento, não irrigados e evapotranspiração de referência (ET_0) durante quatro dias sem chuva (21/09/2003 a 24/09/2003) com irrigação de lâmina igual a 15 mm no dia 22/09/2003 em Londrina, PR.

O consumo hídrico dos tratamentos variou também em função de ET_0 , apresentando comportamentos diferenciados em dias com demanda evaporativa elevada e com demanda evaporativa baixa. Como demonstrado nas Figuras 3.7 e 3.8, em condições de demanda evaporativa elevada o tratamento

irrigado por aspersão apresentou maiores taxas de ET que o tratamento irrigado por gotejamento e não irrigado, por não haver restrição do solo ao fluxo evaporativo devido ao molhamento de toda superfície do solo, ao contrário do tratamento irrigado por gotejamento que limitava a área a ser molhada na irrigação e ao tratamento não irrigado em que a primeira camada do solo permanecia seca, restringindo E. Por outro lado, em dias com demanda evaporativa baixa ET de todos os tratamentos tendeu a aproximar de E_{To} e os tratamentos pouco se diferenciaram, uma vez que o solo foi capaz de suprir a demanda hídrica, mesmo no tratamento não irrigado.

Em geral, a ocorrência de chuva fez com que ET dos tratamentos se igualassem devido à diminuição da demanda atmosférica e ao efeito do molhamento da superfície cultivada. Nos dias subsequentes ocorreram elevadas taxas de ET, da mesma forma que apresentado para o tratamento irrigado por aspersão nas Figuras 3.7 e 3.8. Esse efeito ocorreu na primavera do primeiro ano, o que fez com que as médias de ET do tratamento irrigado por aspersão e não irrigado fossem bastante próximas (Tabela 3.1). Esse efeito também ocorreu com a alta frequência de chuvas de outubro de 2003 a março de 2004, o que pode explicar o aumento de ET média do tratamento não irrigado durante o verão e outono do segundo ano (Tabela 3.1), em resposta ao aumento da área foliar (Figura 3.4B).

3.4. Conclusões

1. Os valores de ET e K_c dos tratamentos analisados variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera e evolução da área foliar;
2. Durante a fase de formação da lavoura em Londrina, PR, o tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou os maiores valores médios anuais de ET (3,1 e 3,4 mm dia^{-1} para o primeiro e segundo ano, respectivamente), seguido do gotejamento (2,9 mm dia^{-1} para o segundo ano) e do não irrigado (2,2 e 2,5 mm dia^{-1} para o primeiro e segundo ano, respectivamente);
3. O valor médio anual de K_c foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (0,99 e 1,03 para o primeiro e segundo ano, respectivamente) e menor para o irrigado por gotejamento (0,92 para o segundo ano).

4. ARTIGO B: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, SEUS COMPONENTES E COEFICIENTES DE CULTIVO SIMPLES E DUAL DE CAFEEIROS EM FASE DE PRODUÇÃO

RESUMO

A quantificação do consumo hídrico das culturas é fundamental para diversas aplicações na agricultura. O objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração (ET), evaporação (E), transpiração (T) e coeficientes de cultivo simples (Kc) e dual, coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb), para cafeeiros em fase de produção (terceiro e quarto ano de cultivo), conduzidos sob irrigação (aspersão e gotejamento) e sem irrigação, em Londrina, PR. Mediu-se ET com lisímetros de pesagem cultivados com cafeeiros da cultivar IAPAR 59, E com microlisímetros instalados sobre os lisímetros e T pela diferença entre ET e E. Os valores de Kc, Ke e Kcb foram determinados nos tratamentos irrigados pela razão entre ET, E e T, respectivamente, e a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método Penman-Monteith na escala diária e pelo método ASCE Penman-Monteith na escala horária. Os resultados mostraram que ET e Kc variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera, fase fenológica e evolução da área foliar. O tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou os maiores valores médios anuais de ET (4,3 e 3,7 mm dia⁻¹ para o terceiro e quarto ano, respectivamente), seguido do gotejamento (3,7 e 3,1 mm dia⁻¹) e do não irrigado (3 e 2,7 mm dia⁻¹). O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento com aspersão (1,3 e 1,1 para o terceiro e quarto ano, respectivamente) e menor para o gotejamento (1,22 e 1 para o terceiro e quarto ano, respectivamente). Os valores de E e Ke variaram com a demanda da atmosfera e método de aplicação de água. Esses fatores influenciaram T e Kcb, além da fenologia e evolução da área foliar. Os valores de E representaram 21 a 57%, 21 a 54% e 21 a 66% os valores de ET, enquanto T representou 43 a 79%, 46 a 79% e 34 a 79% os valores de ET medidos no tratamento sob aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente. Os valores de Ke variaram de 0,19 a 0,79 e 0,15 a 0,39, enquanto os valores de Kcb variaram de 0,35 a 1,09 e 0,33 a 0,79, no tratamento irrigado por aspersão e gotejamento, respectivamente.

Palavras-chave: Lisímetro. Microlisímetro. Evaporação. Transpiração. *Coffea arabica*.

EVAPOTRANSPIRATION, ITS COMPONENTES AND SINGLE AND DUAL CROP COEFFICIENTS OF COFFEE TREES DURING CROP PRODUCTION

ABSTRACT

Quantifying crop consumptive use is essential for many applications in agriculture. The objective of this study was to determine the evapotranspiration (ET), evaporation (E), transpiration (T), in addition to single (Kc) and dual crop coefficients, evaporation coefficient (Ke) and basal crop coefficient (Kcb), for coffee trees during crop production (3rd and 4th year of cultivation) conducted under sprinkler and drip irrigation and no irrigation, in Londrina, PR, Brazil. Crop ET was measured by weighing lysimeters cultivated with coffee plants of cultivar IAPAR 59, E was measured by microlysimeters installed on the lysimeters and T was obtained by the difference between ET and E. The Kc, Ke and Kcb values were determined for the irrigated treatments by the ratio between ET, E and T, respectively, and reference evapotranspiration (ET_o) estimated with the Penman-Monteith method on daily scale and with the ASCE Penman-Monteith method on hourly scale. The values of ET and Kc were influenced by irrigation method, rainfall frequency, atmospheric demand, crop phenology and leaf area evolution. The sprinkler irrigated treatment presented the higher mean annual ET values (4.3 and 3.7 mm day⁻¹ for the 3rd and 4th year, respectively), followed by drip irrigation (3.7 and 3.1 mm day⁻¹) and no irrigation (3 and 2.7 mm day⁻¹). The mean annual Kc value was higher under sprinkler (1.3 and 1.1 for the 3rd and 4th year, respectively) and lower for drip irrigation (1.22 and 1). The measurements of E and Ke varied due to atmospheric demand and water application method. These factors, in addition to crop phenology and leaf area evolution, influenced T and Kcb. The measured values of E represented 21 to 57%, 21 to 54% and 21 to 66% of ET, while T was 43 to 79%, 46 to 79% and 34 to 79% of ET measured on sprinkler, drip and no irrigation treatments, respectively. The Ke values varied from 0.19 to 0.79 and 0.15 to 0.39, while Kcb varied from 0.35 to 1.09 and 0.33 to 0.79 for sprinkler and drip irrigation, respectively.

Key-words: Lysimeter. Microlysimeter. Evaporation. Transpiration. *Coffea arabica*.

4.1. Introdução

A quantificação do consumo hídrico das culturas é fundamental para diversas aplicações na agricultura, tais como estudos de zoneamento agrícola, monitoramento agroclimático, estimativa de safras, manejo de irrigação e drenagem e estudos hidrológicos em geral.

O consumo de água de um cultivo pode ser expresso na forma de evapotranspiração (ET), que engloba os componentes evaporação (E) e transpiração (T). Além de ET do cultivo de interesse, determina-se também a evapotranspiração de referência (ET_o), que corresponde à demanda evaporativa da atmosfera (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998).

Da razão entre ET de uma cultura conduzida sob ótimas condições de manejo (inclusive hídrica) e ET_o, resulta o coeficiente de cultivo (K_c), também chamado de coeficiente de cultivo simples (DOORENBOS; PRUITT, 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998). Segundo Jensen, Burman e Allen (1990), K_c reflete a habilidade de um cultivo em atender a demanda da atmosfera e pode ser usado para estimar ET para outros períodos e localidades.

Segundo Allen et al. (1998), K_c pode ser dividido em dois componentes em função dos componentes de ET. Assim, o coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) consiste na razão entre T da cultura e ET_o, enquanto o coeficiente de evaporação do solo (K_e) consiste na razão entre E e ET_o.

Determinações precisas de ET podem ser obtidas em equipamentos denominados lisímetros, sendo os mais precisos os que usam sistema de pesagem, com possibilidade de se obter medidas em períodos menores que um dia (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL; McCORMICK; PHENE, 1985; HATFIELD, 1990; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; WRIGHT, 1991; ALLEN et al., 1998). Para a determinação dos componentes E e T, uma das alternativas é determinar E utilizando microlisímetros (BOAST; ROBERTSON, 1982) e T pela diferença entre E e ET da cultura medida utilizando lisímetros.

Diversos estudos visando medir ou estimar o consumo de água das espécies cultivadas já foram realizados nas mais variadas condições ambientais, tais como para arroz e girassol (TYAGI; SHARMA; LUTHRA, 2000), trigo e milho (KANG

et al., 2003) e algumas culturas hortícolas (ORGAZ et al., 2005). No entanto, são escassos os trabalhos sobre consumo hídrico do cafeeiro disponíveis na literatura. Em geral, esses trabalhos se baseiam em estimativas indiretas, o que limita a aplicação dos resultados em situações diferentes das que foram conduzidos (CARR, 2001).

Clowes (1984) considerou K_c igual a 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro irrigado por gotejamento. Gutierrez e Meinzer (1994), utilizando o método da razão de Bowen, obtiveram K_c para cafeeiro irrigado por gotejamento de 0,58 para plantas com aproximadamente 12 meses e 0,75 a 0,79 para plantas de 24 a 48 meses. Utilizando o método do fluxo de seiva, estes autores concluíram que T representou entre 40 e 95% dos valores de ET quando IAF aumentou de 1,4 para 6,7.

Por dedução teórica, Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) recomendaram valores de K_c de 0,6 a 0,8 para plantas de até 12 meses, 0,8 a 1 para plantas de 12 a 36 meses e de 1 a 1,2 para plantas com mais de 36 meses. Para lavouras de café com 2 a 3 m de altura, conduzidas sem cobertura nas entrelinhas em clima subúmido, Allen et al. (1998) recomendam valores de K_c inicial, médio e final de 0,9, 0,95 e 0,95, respectivamente, e valores de K_{cb} inicial, médio e final de 0,8, 0,9 e 0,9.

Arruda et al. (2000), por monitoramento de água no solo, obtiveram K_c para cafeeiro irrigado por aspersão convencional de 0,73 a 0,75 nos primeiros anos, e de 0,87 a 0,93 aos sete e oito anos. Utilizando lisímetros de percolação, Antunes et al. (2000) determinaram K_c de 0,35 para o período mais seco e 0,4 para o mais chuvoso em cafeeiro irrigado por gotejamento em fase de formação (10 a 20 meses de transplante).

Utilizando lisímetros de pesagem, Righi (2004) determinou valores de K_c entre 1,04 e 1,3 para cafeeiro de 12 a 24 meses, adensado (3,5 x 0,9 m), com vegetação nas entrelinhas e irrigado por gotejamento. Marin et al. (2005), nas mesmas condições de Righi (2004), porém utilizando o método da razão de Bowen, determinaram K_c de plantas com cinco anos de idade e obtiveram K_c médio igual a 1, mas que variou entre 0,6 e 1,9. Utilizando o método do fluxo de seiva, esses autores encontraram K_e médio de 0,24 e K_{cb} médio de 0,78. Dessa forma, os autores consideraram que T variou em função de ET_o e consideraram K_{cb} igual a 1,27 para ET_o menor que 2 mm dia^{-1} , 0,87 para ET_o entre 2 e 4 mm dia^{-1} e 0,67

para ETo maior que 4 mm dia⁻¹.

O presente trabalho teve como objetivos determinar ET, E e T de cafeeiros conduzidos sob irrigação (aspersão e gotejamento) e sem irrigação, durante a fase de produção da lavoura, em Londrina, PR, e Kc, Ke e Kcb dos tratamentos sob irrigação.

4.2. Material e Métodos

O estudo foi conduzido no Instituto Agronômico do Paraná (Iapar), em Londrina, PR (latitude 23°18'S, longitude 51°09'O e altitude de 585 m), durante o período de 01/09/2004 a 31/08/2006, correspondente ao terceiro e quarto ano de cultivo. O solo é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico, segundo Embrapa (1999), e o clima é subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen, com média anual de temperatura de 21,5 °C e precipitação que varia de 1.400 a 1.600 mm anuais (IAPAR, 1994).

Foram instalados cinco lisímetros de pesagem de 1,9 m de comprimento, 1,4 m de largura (2,66 m²) e 1,3 m de profundidade, conforme descrito por Faria, Campeche e Chibana (2006). Cafeeiros (*Coffea arabica* L.) da cultivar IAPAR 59 foram plantados em outubro de 2002, no espaçamento 2 x 1,6 m, com duas plantas por cova (0,3 m entre plantas), nos lisímetros e na bordadura, totalizando 115,2 m² (14,4 x 8 m). A área era circundada por grama e localizada ao lado das Estações Meteorológicas do Iapar e do Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), conforme apresentado nas Figuras 4.1 e 4.2.

A direção predominante dos ventos na área experimental ocorre no sentido leste-oeste (IAPAR, 1994). Assim, foi possível projetar a área experimental em dimensões reduzidas devido à presença de uma extensa área cultivada com cafeeiros nas direções nordeste, leste e sudeste que serviam como bordadura.

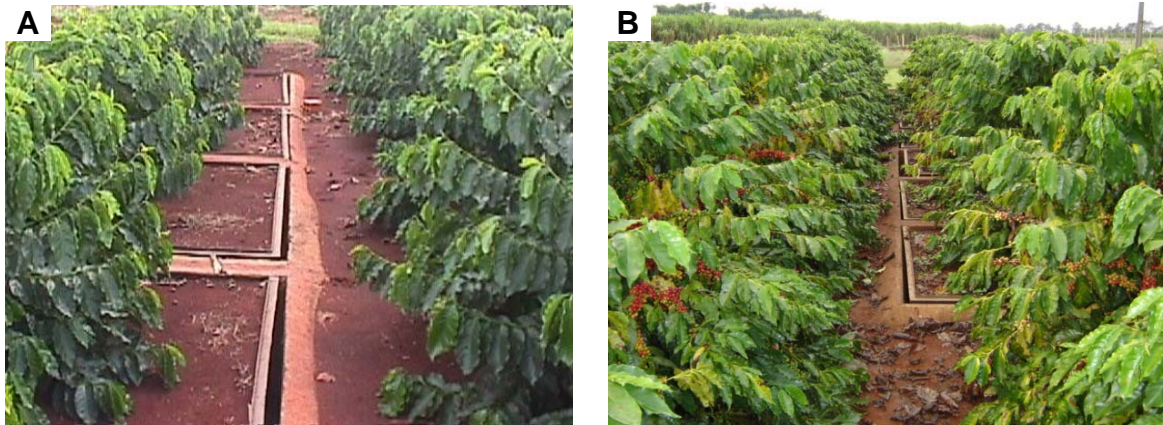


Figura 4.1. Área experimental com cafeeiros cultivados nos lisímetros e na bordadura em 09/11/2004 (A) e 16/05/2005 (B).

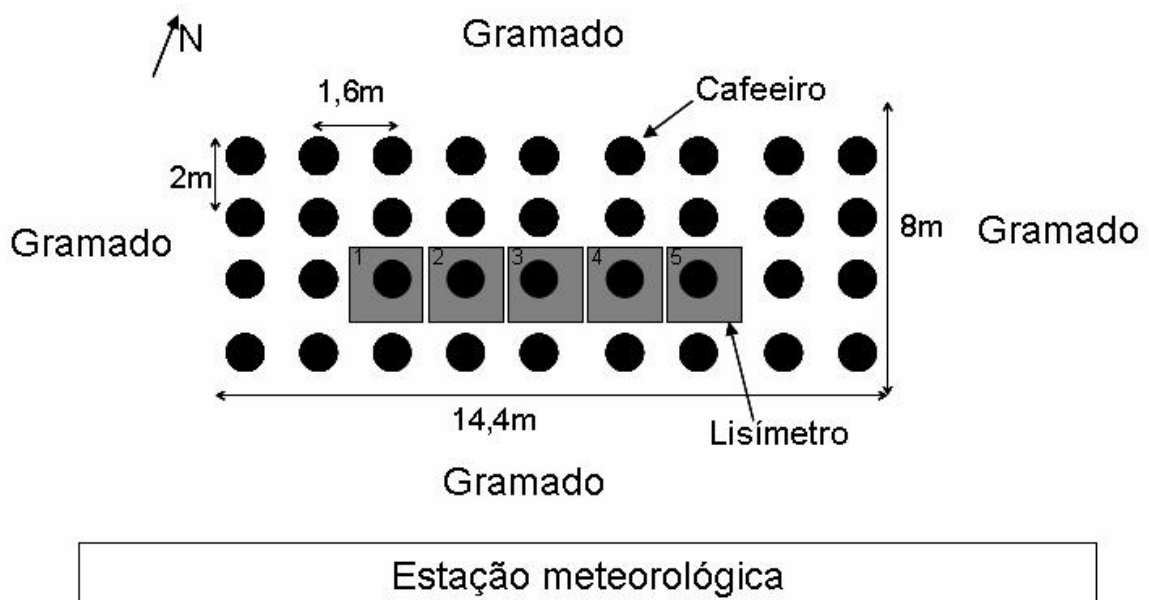


Figura 4.2. Croqui da área experimental, em que os lisímetros 1 e 2 foram irrigados por aspersão, lisímetros 3 e 4 não foram irrigados e lisímetro 5 foi irrigado por gotejamento.

Os lisímetros estão assentados sobre um quadro metálico acoplado a um conjunto de alavancas para redução de massa em aproximadamente 45 vezes a massa total que é de aproximadamente 6 ton (Figura 4.3A). Possuem sistema de drenagem com reservatórios de armazenamento de água constituídos de dois tubos de PVC, colocados sob os lisímetros, que possibilitam o armazenamento da água percolada pelo perfil do solo (Figura 4.3B). A água de drenagem é contabilizada pelo sistema de pesagem até a abertura dos registros. A variação de massa de cada lisímetro é medida por uma única célula de carga (detalhe da Figura 4.3B), que emite sinais elétricos com sensibilidade de $2 \pm 10 \text{ mV V}^{-1}$ e trabalha com acuracidade de 0,02% do fundo de escala. O sinal elétrico de cada célula de carga é

captado por um sistema de aquisição de dados constituído de um multiplexador (AM416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, USA) e de uma unidade de armazenamento de dados (CR10X, Campbell Scientific, Logan, USA) para posteriormente ser transferido para um módulo de memória ou computador (Figura 4.3C). A conversão dos sinais elétricos para massa do lisímetro foi realizada por equações de regressão previamente calibradas por Faria, Campeche e Chibana (2006) e o cálculo da lâmina de água foi realizado pela Equação 4.1:

$$L = \frac{M}{A} \quad (4.1)$$

na qual L é a lâmina de água (mm), M é a massa de água (Kg) e A é a área de superfície do lisímetro (m²). Não houve nenhuma correção nos dados de M ou L devido à diferença entre a área da superfície do lisímetro (2,66 m²) e a área de terreno ocupada pela cova de plantas (3,2 m²), por entender que a superfície do lisímetro representou quase a totalidade (83%) da área ocupada pelas duas plantas da cova.



Figura 4.3. Componentes dos lisímetros. Balança com sistema de redução de massa e coxim no detalhe (A), sistema de drenagem e célula de carga no detalhe (B) e sistema de aquisição e armazenamento de dados (C).

Foram irrigadas as plantas de dois lisímetros por aspersão e um por gotejamento (iniciado em 04/08/2003), mantendo-se sem irrigação outros dois lisímetros (Figura 4.2). As irrigações foram realizadas com frequência de uma a duas vezes por semana, visando repor a umidade do solo ao nível próximo da condição de capacidade de campo (CC). Atribuiu-se o valor de 150 mm à lâmina de armazenamento de água na CC, que correspondeu à massa do lisímetro, descontada a drenagem e a evaporação, depois de quatro dias de ocorrência de chuva suficiente para saturar o solo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005). O armazenamento no ponto de murcha permanente (PMP) foi obtido a partir da caracterização física do solo do local (FARIA; CARAMORI, 1986), que mostrou valor de água disponível igual a 10% vol.. Portanto, para a profundidade de 1,3 m do

lisímetro utilizado, o valor de capacidade de água disponível (CAD) foi igual a 130 mm e o armazenamento no PMP foi assumido como sendo correspondente à massa do lisímetro na CC descontados 130 mm (20 mm).

A irrigação por aspersão foi simulada aplicando-se manualmente a água em toda a superfície dos lisímetros utilizando-se um regador plástico, enquanto que a irrigação por gotejamento foi realizada em um raio de aproximadamente 0,2 m do tronco do cafeeiro usando um tubo gotejador de formato circular, alimentado por um reservatório elevado suprido manualmente de água.

Os valores de ET foram determinados pela contabilidade das entradas, saídas e armazenamento de água nos lisímetros de acordo com a Equação 4.2:

$$ET = P + I \pm ES - D \pm \Delta A \quad (4.2)$$

em que ET é a evapotranspiração, P é a precipitação, I é a lâmina de água irrigada, ES é o escoamento superficial, D é a drenagem e ΔA é a variação de armazenamento de água nos lisímetros (todas unidades em mm). O valor de ES foi considerado nulo devido à borda elevada dos lisímetros (cerca de 3 cm) e a precipitação foi medida na estação meteorológica do Simepar.

A medição de E foi realizada usando microlisímetros adaptados de Boast e Robertson (1982) por Flumignan e Faria (2007). Os microlisímetros (Figura 4.4) foram construídos usando estrutura dupla de PVC rígido, com a estrutura interna medindo 100 mm de diâmetro interno, 150 mm de comprimento e 2,5 mm de espessura da parede. A estrutura externa constituiu um envoltório de 110 mm de diâmetro interno e que apresentava comprimento e espessura semelhante à estrutura interna. Desta forma, a estrutura interna era cravada no solo de forma a preencher quase todo o seu volume com solo, para em seguida ser extraída e ter o fundo vedado com tampa plástica para evitar a drenagem. Em seguida, o envoltório era instalado no local de onde foi retirado o solo, para depois ser retornada a estrutura interna dentro do envoltório. Assim, E era obtida a partir da variação de massa dos microlisímetros que foi determinada diariamente em balança de precisão e em diferentes épocas: 1ª série (20/09/2004 a 23/09/2004), 2ª série (01/02/2005 a 03/02/2005), 3ª série (07/06/2005 a 10/06/2005), 4ª série (20/09/2005 a 23/09/2005), 5ª série (31/01/2006 a 03/02/2006) e 6ª série (16/05/2006 a 19/05/2006).

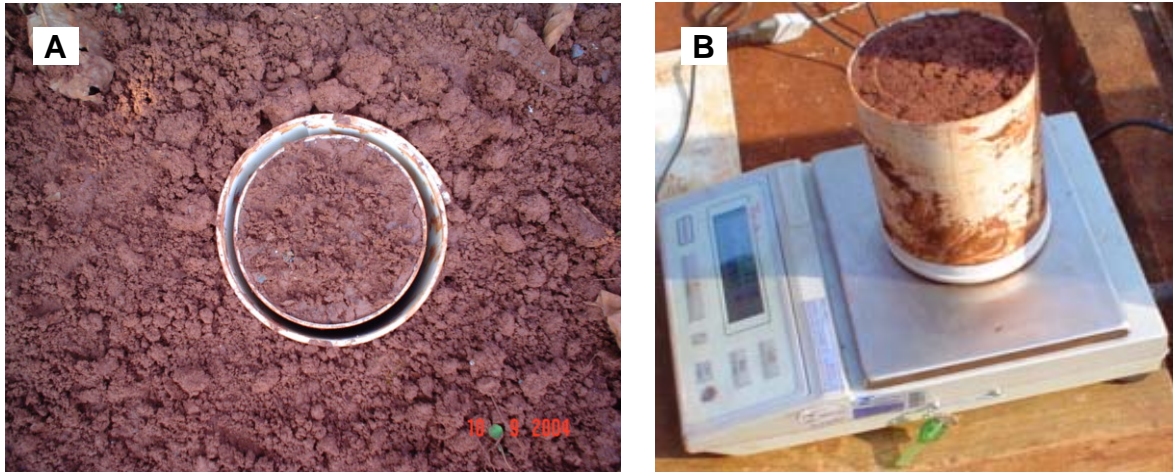


Figura 4.4. Microlisímetro instalado (A) e o momento da pesagem para determinação da evaporação (B) (retirado de FLUMIGNAN; FARIA, 2007).

Para a escolha do local de montagem dos microlisímetros, a área de cada lisímetro foi dividida em seis partes iguais. Em cada uma das seis épocas avaliadas, foram instaladas seis repetições de microlisímetros por lisímetro, cada repetição dentro da sua respectiva área previamente determinada na divisão do lisímetro. Considerou-se que esse número de repetições foi suficiente para representar a evaporação total do lisímetro.

Para compor os valores de E de cada tratamento, foi utilizada a média de E de doze repetições nos tratamentos irrigado por aspersão e não irrigado (dois lisímetros para cada tratamento, cada um com seis repetições de microlisímetros) e seis repetições no tratamento irrigado por gotejamento (seis repetições em um lisímetro). Os valores de T foram determinados a partir da diferença entre os valores de ET medidos nos lisímetros e E medidos nos microlisímetros.

Os valores de K_c dos tratamentos irrigado por aspersão e gotejamento foram determinados de acordo com a Equação 4.3:

$$K_c = \frac{ET}{ET_o} \quad (4.3)$$

sendo K_c o coeficiente de cultivo simples (adimensional), ET a evapotranspiração do cultivo (mm dia^{-1}) e ET_o a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}). Valores diários de ET_o determinados pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) foram calculados pelo programa REF-ET (ALLEN, 2000) usando dados diários da estação meteorológica do Simepar.

Os valores de K_e e K_{cb} dos tratamentos irrigados por aspersão e

gotejamento foram determinados de acordo com as Equações 4.4 e 4.5:

$$K_e = \frac{E}{ET_o} \quad (4.4)$$

e

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_o} \quad (4.5)$$

sendo K_e o coeficiente de evaporação do solo, K_{cb} o coeficiente de cultivo basal, E a evaporação, T a transpiração e ET_o a evapotranspiração de referência (todas as unidades em mm, exceto os coeficientes que são adimensionais). Valores horários de ET_o determinados pelo método ASCE Penman-Monteith horário (WALTER et al., 2000), também foram calculados no programa REF-ET usando dados horários da estação meteorológica do Simepar.

Os valores de ET dos diferentes tratamentos, ET_o e K_c foram agrupados em médias referentes às estações do ano. Os valores médios de ET_o referem-se à média de todos os valores observados no período, enquanto os valores médios de ET foram obtidos com um número menor de dados, considerando que houve falhas de medidas. Conseqüentemente, K_c foi determinado somente nos dias em que houve medidas de ET e sua média foi resultante de tais determinações. Desta forma, todos os valores de ET e K_c apresentados correspondem à média de mais de 50% dos dias do período, com exceção de ET e K_c do tratamento irrigado por aspersão no verão e outono do terceiro ano, 7 e 35%, respectivamente; ET do tratamento não irrigado no verão e outono do terceiro ano e verão do quarto ano, 24, 45 e 35%, respectivamente; e, ET e K_c do tratamento irrigado por gotejamento no verão do terceiro ano, 24%.

Periodicamente foi avaliada a altura de plantas e calculado o índice de área foliar (IAF). Determinou-se a altura medindo-se com uma trena o comprimento do ramo ortotrópico a partir do nível do solo. O valor de IAF foi obtido pela razão entre a área de folhas e área do terreno ocupado pelas plantas analisadas.

A área de folhas foi determinada por método amostral não destrutivo, de acordo com o seguinte procedimento: a) determinação do número de ramos plagiotrópicos das duas plantas de cada lisímetro; b) amostragem e contagem do número de folhas de nove ramos plagiotrópicos de cada lisímetro, sendo três para cada terço das plantas (terço inferior, médio e superior). Esses ramos eram

redefinidos a cada ano de cultivo, em meados de setembro, quando se iniciava um novo ciclo fenológico; c) medição do comprimento e largura de 30 folhas de cada lisímetro, amostradas aleatoriamente no dossel, sendo dez para cada terço das plantas. A área de cada folha amostrada foi obtida usando-se as medidas de comprimento e largura na Equação 4.6, que foi previamente calibrada por Flumignan, Adami e Faria (2007):

$$AF = 0,6751(C \times L) + 0,3533 \quad (4.6)$$

na qual AF é a área da folha (cm²), C é o comprimento da folha (cm) e L a largura da folha (cm).

A área de folhas foi determinada pela Equação 4.7:

$$AFolhas = NR \times NFramo \times AF \quad (4.7)$$

sendo AFolhas a área de folhas por cova (cm²), NR o número de ramos plagiotrópicos, NFramo a média do número de folhas nos nove ramos amostrais e AF a área foliar média obtida de 30 folhas amostradas (cm²). Por fim, ao dividir este valor, pela área de terreno (3,2 m²), foi obtido IAF.

A produtividade foi determinada por colheitas manuais de todos os grãos em estágio “cereja”, realizadas no período de 05/05/2005 a 10/08/2005 (terceiro ano) e 11/04/2006 a 07/08/2006 (quarto ano).

O manejo da cultura foi realizado segundo recomendações do Iapar. O controle de plantas daninhas, inclusive nas entrelinhas, pragas e doenças, assim como a aplicação de fertilizantes e a correção da acidez do solo, foram realizados sempre que necessário.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Crescimento e produtividade

Os tratamentos praticamente não diferiram quanto ao crescimento em altura (Figura 4.5A). O cafeeiro irrigado por aspersão cresceu de 114 para 170 cm (56 cm), o não irrigado de 115 para 175 cm (60 cm) e o irrigado por gotejamento

de 105 para 158 cm (53 cm). As taxas de crescimento foram similares entre os tratamentos, exceto no outono-inverno do quarto ano, quando a taxa de crescimento do cafeeiro não irrigado foi ligeiramente superior aos que receberam irrigação.

O crescimento da área foliar apresentou grande oscilação estacional e os tratamentos se comportaram de maneira diferenciada ao longo do terceiro e quarto ano de cultivo (Figura 4.5B). Durante o terceiro ano, o cafeeiro irrigado por gotejamento manteve área foliar maior que os demais tratamentos, aumentando IAF de 5,9 para 11,9 na primavera, permaneceu nesse patamar até o outono e depois decresceu para 9,6 no inverno. O tratamento não irrigado apresentou IAF intermediário durante a primavera-verão (5,5 a 9,3) e valores inferiores (5,2 a 5,4) aos tratamentos irrigados durante o outono e inverno, que são estações secas e de menor atividade fisiológica do cafeeiro (CAMARGO; CAMARGO, 2001). O tratamento irrigado por aspersão apresentou IAF mais baixo na primavera e verão do terceiro ano (5 a 8,6), porém aumentou significativamente sua área foliar no outono (8,6 para 12,7), igualando-se ao tratamento irrigado por gotejamento, e depois decresceu no inverno a valores próximos do tratamento não irrigado (4,6).

No quarto ano, todos os tratamentos apresentaram tendência clara de aumento do porte das plantas, evidenciado pelo aumento dos valores de IAF, sem posterior queda na estação seca como ocorreu no terceiro ano. Assim, da primavera ao inverno do quarto ano, o tratamento irrigado por aspersão aumentou IAF de 7,5 para 13,9, o tratamento não irrigado aumentou de 8,1 para 17,4 e o tratamento com gotejamento aumentou de 7,8 para 19,2.

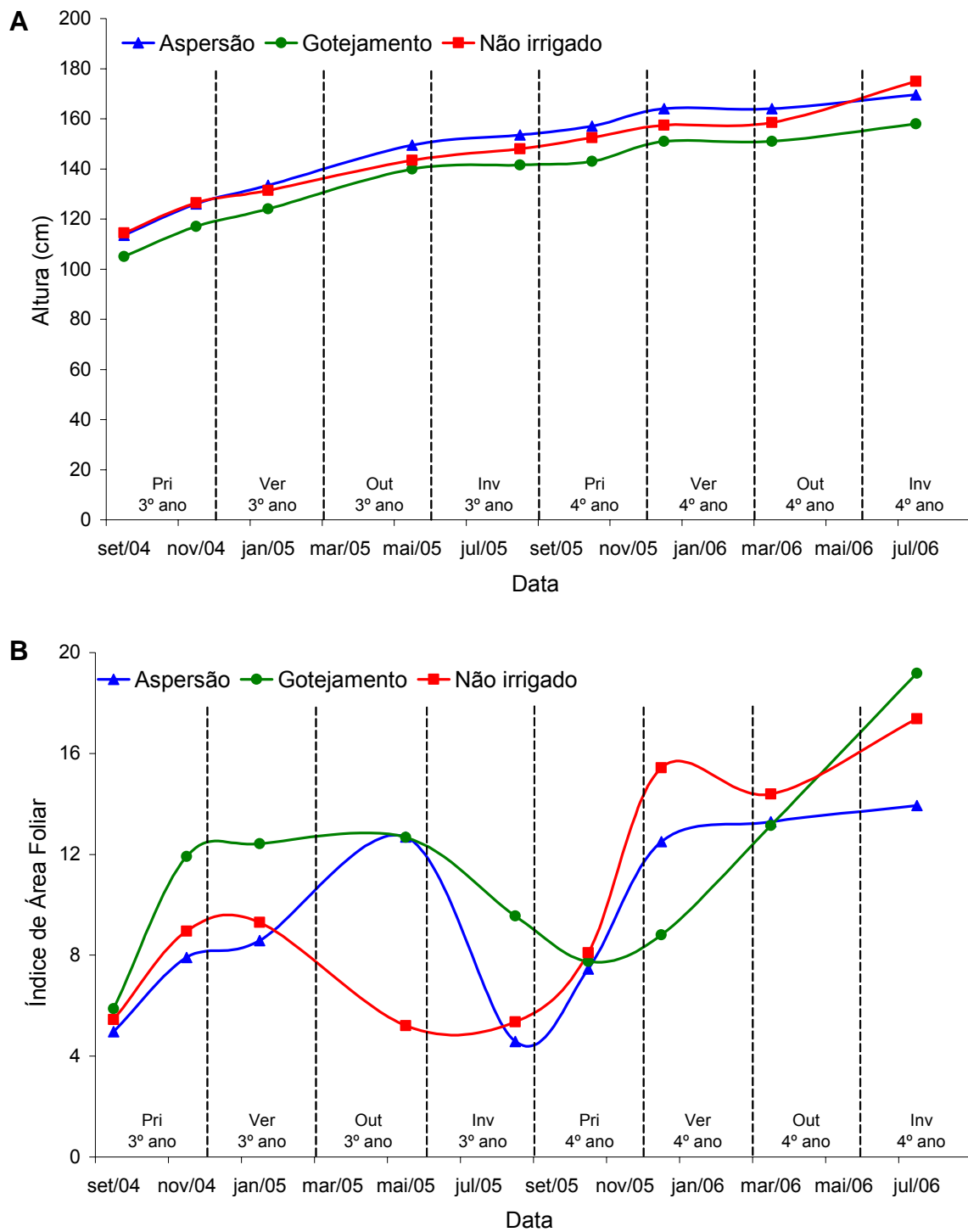


Figura 4.5. Altura (A) e índice de área foliar (B) de cafeeiro irrigado por aspersão, gotejamento e não irrigado na fase de produção em Londrina, PR.

A produtividade observada nos cafeeiros irrigados foi maior que no cafeeiro não irrigado. A produtividade foi elevada no terceiro ano, correspondente ao primeiro ano produtivo, e decresceu significativamente no quarto ano, em decorrência do efeito conhecido como bienalidade do cafeeiro. Em média, os

tratamentos irrigados produziram 1784 e 374 g cova⁻¹ no terceiro e quarto ano, respectivamente, enquanto o tratamento não irrigado produziu 1117 e 321 g cova⁻¹.

Os valores de produtividade apresentados indicam que a condução das plantas foi realizada de forma correta e homogênea, atendendo a uma das exigências de trabalhos que visam determinar Kc das culturas, que consiste em atingir máxima produção no ambiente em que a cultura está inserida (ALLEN et al., 1998).

4.3.2. Determinação da evapotranspiração

Os tratamentos irrigados por aspersão e gotejamento estiveram sempre com suprimento hídrico satisfatório (Figura 4.6). A umidade do solo foi mantida acima de 50% da fração de água disponível durante todo o período estudado. Conforme Allen et al. (1998), essa condição é considerada pré-requisito fundamental para estudos que envolvem a determinação de Kc.

Por outro lado, o tratamento não irrigado esteve em alguns períodos com a umidade do solo próxima da condição de PMP, ou até mesmo abaixo dela, caracterizando ocorrência de deficiência hídrica. Nesses períodos (outubro/2004, março a maio/2005 e maio a agosto/2006), a ocorrência da deficiência hídrica acusada pelo baixo armazenamento de água nos lisímetros refletiu no menor crescimento (Figura 4.5) e produção da cultura sem suplementação hídrica, porém, esse efeito foi minimizado quando ocorreu no inverno, coincidindo com a fase menos ativa da planta, conforme escala fenológica de Camargo e Camargo (2001).

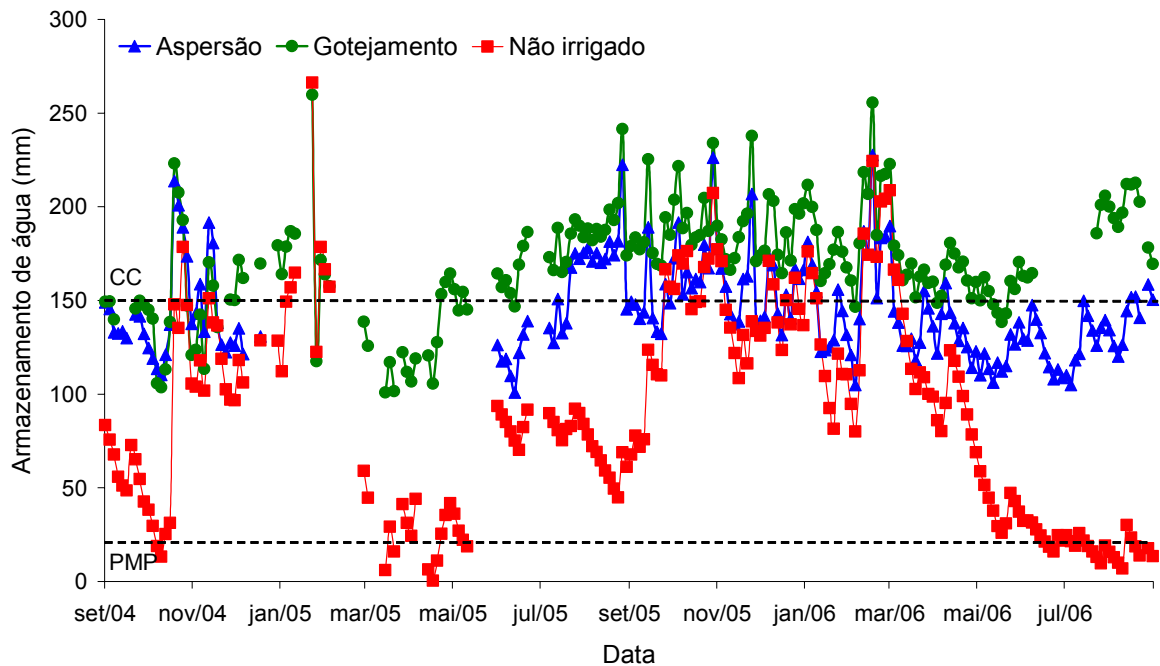


Figura 4.6. Variação do armazenamento mínimo diário de água no perfil do solo determinado com o uso de lisímetros de pesagem cultivados com cafeeiros em fase de produção em Londrina, PR.

Os valores de ET dos três tratamentos seguiram a variação da ETo durante o período analisado, com maiores valores de setembro a abril e menores de maio a agosto (Figura 4.7A). O tratamento sob aspersão foi o que apresentou taxas mais elevadas de ET, sendo próximas ou superiores a ETo durante quase todo o período experimental. Valores intermediários de ET ocorreram no tratamento sob gotejamento e as menores taxas foram observadas no tratamento não irrigado. Isso pode ser explicado pela relação direta existente entre E e a umidade na camada superficial do solo, que é maior no tratamento irrigado por aspersão, intermediário no gotejamento e menor no tratamento sem irrigação. Esse fenômeno é bastante evidente em condições de pouca cobertura do solo pelo dossel foliar, como ocorreu na fase de formação do cafeeiro, relatado no Capítulo 3 deste trabalho. Além disso, os tratamentos irrigados por aspersão e gotejamento, por terem água sempre facilmente disponível (Figura 4.6), apresentam maiores taxas de T em comparação ao tratamento não irrigado, que está sempre sujeito à deficiência hídrica, conforme será demonstrado a seguir na análise da partição de ET em E e T no item 4.3.3.2.

A demanda atmosférica média anual, expressa por ETo, foi similar entre o terceiro e quarto ano (ambos iguais a $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$), com maiores valores durante a primavera e verão ($3,4$ a $3,9 \text{ mm dia}^{-1}$), intermediários no outono ($2,9$ a $3,3$

mm dia⁻¹) e menores no inverno (2,3 a 2,7 mm dia⁻¹) (Tabela 4.1). A média anual de ET diminuiu do terceiro para o quarto ano em todos os tratamentos. Assim, no tratamento com aspersão, os valores médios anuais de ET diminuíram de 4,3 para 3,7 mm dia⁻¹, no gotejamento, de 3,7 para 3,1 mm dia⁻¹ e no tratamento não irrigado, de 3 para 2,7 mm dia⁻¹. Conseqüentemente, o consumo hídrico do tratamento irrigado por aspersão foi 40% e 38% mais alto que o tratamento não irrigado para o terceiro e quarto ano, respectivamente. Sob gotejamento, o consumo hídrico foi 21% e 17% superior ao não irrigado para o terceiro e quarto ano, respectivamente, e 13% e 15% inferior ao tratamento irrigado por aspersão. Sob aspersão, gotejamento e sem irrigação, os maiores valores de ET ocorreram na primavera e verão (3,4 a 5,3 mm dia⁻¹, 3,1 a 4,6 mm dia⁻¹ e 3 a 4,6 mm dia⁻¹, respectivamente), foram intermediários no outono (3,4 a 5 mm dia⁻¹, 2,9 a 4,4 mm dia⁻¹ e 2,6 a 3 mm dia⁻¹, respectivamente) e menores no inverno (2,4 a 2,6 mm dia⁻¹, 2 a 2,4 mm dia⁻¹ e 1,3 a 1,6 mm dia⁻¹, respectivamente).

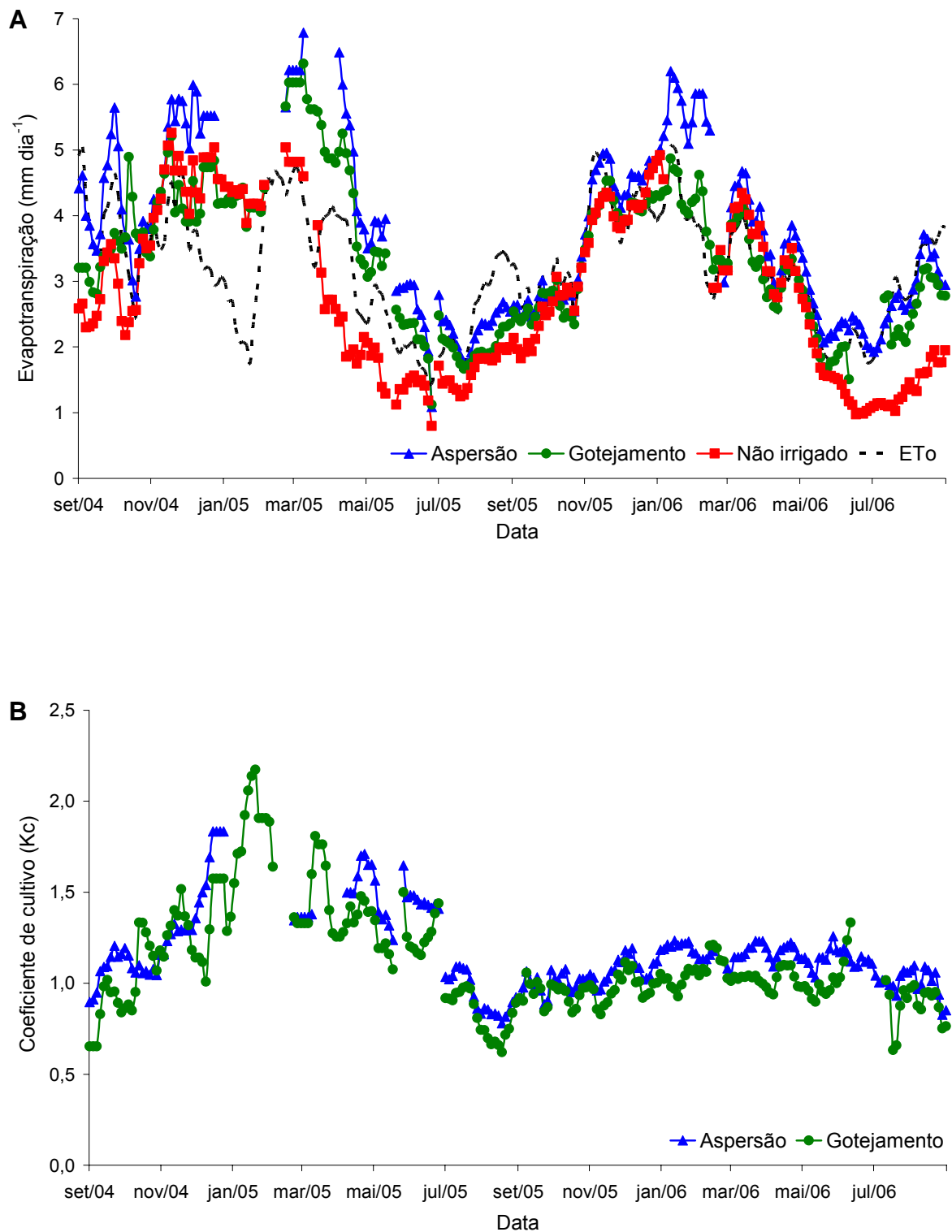


Figura 4.7. Evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração (A), e coeficientes de cultivo simples (B) de cafeeiros sob aspersão, gotejamento e não irrigado, obtidos por média móvel de 15 dias, durante a fase de produção da lavoura em Londrina, PR.

Tabela 4.1. Médias de evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração (ET) e coeficientes de cultivo simples (Kc) de cafeeiros irrigado por aspersão (A), gotejamento (G) e não irrigado (NI), durante estações do ano agrícola na fase de produção da lavoura em Londrina, PR.

Ano agrícola	Estação	ET _o	ET			Kc	
			A	G	NI	A	G
			(mm dia ⁻¹)				
2004 / 05 (3º ano)	Primavera	3,9	4,3	3,7	3,4	1,14	1,07
	Verão	3,4	5,3	4,6	4,6	1,50	1,51
	Outono	3,3	5,0	4,4	2,6	1,46	1,35
	Inverno	2,3	2,4	2,0	1,6	1,10	0,95
	Média	3,2	4,3	3,7	3,0	1,30	1,22
2005 / 06 (4º ano)	Primavera	3,4	3,4	3,1	3,0	1,01	0,94
	Verão	3,9	5,3	4,1	3,4	1,16	1,06
	Outono	2,9	3,4	2,9	3,0	1,16	1,00
	Inverno	2,7	2,6	2,4	1,3	1,05	1,01
	Média	3,2	3,7	3,1	2,7	1,10	1,00

4.3.3. Determinação dos coeficientes de cultivo

4.3.3.1. Determinação do coeficiente de cultivo simples

Da mesma forma que obtido para ET, os valores de Kc variaram durante o ano e foram mais elevados no tratamento com aspersão e menores no gotejamento (Figura 4.7B, Tabela 4.1). A média anual de Kc do tratamento irrigado por aspersão foi igual a 1,3 e 1,1, no terceiro e quarto ano, respectivamente, e 1,22 e 1 para o tratamento irrigado por gotejamento. Em condição de irrigação por aspersão, as médias de Kc no terceiro ano aumentaram de 1,14 na primavera para 1,5 no verão e 1,46 no outono, diminuindo esse valor durante o inverno para 1,1. No quarto ano, os valores de Kc continuaram acima de 1 no tratamento sob aspersão, 1,01 na primavera, 1,16 no verão e 1,16 no outono, decrescendo para 1,05 no inverno. Comportamento similar ocorreu no tratamento irrigado por gotejamento, em que Kc aumentou no terceiro ano de 1,07 na primavera para 1,51 no verão e 1,35 no outono, decrescendo para 0,95 no inverno. No quarto ano, os valores de Kc situaram-se próximos de 1, sendo 0,94 na primavera, 1,06 no verão, 1 no outono e 1,01 no inverno.

Conforme observado na Tabela 4.1, no verão do terceiro ano os valores de Kc de ambos os tratamentos foram bastante altos (1,5 e 1,51 para aspersão e gotejamento, respectivamente). Isso pode ser devido à precipitação muito elevada (543 mm) e frequente ocorrida durante o período de dezembro de 2005 a fevereiro de 2006. Em consequência, os dias foram excessivamente nublados, com temperaturas relativamente baixas, com pouca radiação e alta umidade relativa, o que resultou em baixa demanda atmosférica (Figura 4.7A). No entanto, as taxas de ET em todos os tratamentos continuaram altas e maiores que ETo (Figura 4.7A). Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que neste período as perdas por E eram elevadas, em decorrência do constante umedecimento da superfície do solo provocado pelas chuvas frequentes. Além disso, segundo Maestri e Barros (1977), Rena e Maestri (1985), Carr (2001) e DaMatta (2004), a fotossíntese e a transpiração do cafeeiro não sofrem restrições sob essas condições climáticas, diferentemente do que ocorre sob condições de alta demanda atmosférica. Portanto, a transpiração da cultura pode ter se mantido muito acima da ETo em função de não ter havido restrição ao fluxo de T. Aliado a isso, segundo Camargo e Camargo (2001), esse período coincide com a fase fenológica de intensa vegetação e granação dos frutos do cafeeiro. Este fato também ocorreu no trabalho de Gutierrez e Meinzer (1994), no qual a média de Kc do ano de alta demanda atmosférica foi 30% inferior ao determinado no ano de baixa demanda, sendo atribuído esse fato à diminuição na condutância estomática em decorrência do alto déficit de pressão de vapor no ano de alta demanda atmosférica.

Os valores médios de Kc determinados no presente trabalho para aspersão (1,3 e 1,1, para o terceiro e quarto ano, respectivamente) foram maiores que os sugeridos por Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) para população de plantas semelhante dos 12 aos 36 meses (0,6 a 0,8) e também aos apresentados por Arruda et al. (2000) na fase adulta da lavoura (0,87 a 0,93 aos 7 e 8 anos). A dedução teórica de Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) e o método de monitoramento de água no solo usado por Arruda et al. (2000) podem incluir simplificações que levaram os autores a subestimar os valores de Kc, uma vez que a lisimetria de pesagem utilizada neste trabalho apresenta alta precisão de medida (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006). Ainda assim, os valores apresentados por Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) para plantas com mais de 36 meses (1 a 1,2) estão de acordo com o valor de Kc obtido neste trabalho para o quarto ano de

cultivo (1,1).

Os valores de Kc apresentados por Allen et al. (1998), são mais baixos que os obtidos nesse trabalho, tanto para o cafeeiro irrigado por aspersão, como para o cafeeiro irrigado por gotejamento. Essa constatação vai de encontro à observação de Carr (2001), de que os valores apresentados em Allen et al. (1998) devem ser submetidos à validação.

O valor médio de Kc determinado no terceiro ano para o tratamento irrigado por gotejamento (1,22) foi muito maior que os valores sugeridos por Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) para população de plantas semelhante, dos 12 aos 36 meses (0,6 a 0,8). No entanto, assim como para o tratamento irrigado por aspersão, os valores apresentados por Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) para plantas com mais de 36 meses (1 a 1,2) estão de acordo com o valor de Kc obtido neste trabalho para o quarto ano de cultivo (1).

Ainda para gotejamento, os valores de Kc obtidos por Gutierrez e Meinzer (1994) para plantas de 24 a 48 meses (0,75 a 0,79) ficaram abaixo dos encontrados neste trabalho para o mesmo período (1 e 1,22).

Além de apresentar valores de Kc para cafeeiro sob gotejamento muito menores que os observados neste trabalho, Clowes (1984) recomendou Kc único (0,6) para todas as fases fenológicas, o que foi comprovado ser incorreto pelos resultados obtidos no presente estudo, uma vez que os valores de Kc variaram durante o desenvolvimento fenológico da cultura, tanto na aspersão como no gotejamento (Figura 4.7B, Tabela 4.1), fato também constatado na fase de formação (Capítulo 3).

Embora o valor médio de Kc encontrado para o terceiro ano do cafeeiro irrigado por gotejamento (1,22) tenha sido maior que o observado por Marin et al. (2005) em plantas com cinco anos, essa diferença pode estar associada ao fato de que Marin et al. (2005) trabalharam apenas no período de agosto a outubro, que tipicamente são épocas secas e de baixa demanda atmosférica, além de que esse período compreende a fase de dormência do cafeeiro (CAMARGO; CAMARGO, 2001), resultando em baixo valor de Kc. Do contrário, o valor de Kc determinado neste trabalho para o terceiro ano foi elevado devido ao alto valor de Kc encontrado no verão chuvoso (1,51). Por outro lado, o valor médio de Kc encontrado por Marin et al. (2005) foi exatamente igual ao obtido no quarto ano (1). Marin et al. (2005) também determinaram variações de Kc (0,6 a 1,9) semelhantes às medidas

no presente estudo (Figura 4.7B).

4.3.3.2. Partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração e determinação do coeficiente de cultivo dual

Alguns problemas ocorreram na determinação de ET, E e T quando foram instalados os microlisímetros (Figura 4.8, Tabela 4.2). Na 1ª e 2ª séries não foram instalados os microlisímetros no tratamento irrigado por gotejamento. Na 2ª série não foram determinados os valores de ET e T no tratamento irrigado por aspersão e ET no tratamento irrigado por gotejamento, devido a problemas ocorridos no funcionamento dos lisímetros. No dia 22/09/2005, na 4ª série, não foram determinados os valores de E e T em todos os tratamentos devido a ocorrência de chuva. Em geral, o funcionamento dos microlisímetros é precário em condições de chuva, apresentando resultados não confiáveis, mesmo com pequeno volume como ocorrido naquela data (5 mm), o que inviabiliza o uso deste sistema nessas condições, concordando com Allen (1990).

Os valores de E se comportaram de maneira diferenciada entre os períodos de medida e tratamentos, variando de 0,52 a 3,19 mm dia⁻¹, 0,41 a 1,41 mm dia⁻¹ e 0,32 a 1,92 mm dia⁻¹ no tratamento irrigado por aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente (Figura 4.8, Tabela 4.2).

As plantas apresentavam IAF maior que 4 durante todo o período experimental (Figura 4.5B), sombreando grande parte ou completamente o solo. Dessa forma, os valores de E não se mostraram sensíveis às variações nos valores de IAF. Portanto, as variações nos valores de E podem ser atribuídas à demanda atmosférica e ao método de irrigação.

As maiores taxas de E foram medidas na primavera e verão (1ª, 2ª, 4ª e 5ª séries), quando ocorreu elevada demanda evaporativa ($E_{To} > 3 \text{ mm dia}^{-1}$). Nessas determinações, os valores de E medidos no tratamento irrigado por aspersão foram maiores que os demais, pelo fato de se aplicar a água em toda a superfície do terreno, favorecendo as perdas por E. Nas mesmas condições, E do tratamento sob gotejamento foi ligeiramente superior ou igual ao não irrigado, evidenciando a economia hídrica da irrigação localizada, que aplica a água somente

na região sombreada pela copa. As menores taxas de E foram determinadas durante o outono e inverno (3ª e 6ª séries). Nesses períodos prevaleciam condições de baixa demanda evaporativa ($ET_o < 3 \text{ mm dia}^{-1}$), resultando em valores de E semelhantes para os tratamentos avaliados.

Da mesma forma que as medidas de E, os valores de K_e variaram principalmente com a demanda atmosférica e com o método de irrigação, já que as plantas encontravam-se com área foliar elevada ($IAF > 4$). Variaram de 0,19 a 0,79 e 0,15 a 0,39 no tratamento irrigado por aspersão e gotejamento, respectivamente (Figura 4.9, Tabela 4.2).

Os maiores valores de K_e ocorreram nas determinações da 1ª, 2ª, 4ª e 5ª série, realizadas durante a primavera e verão, coincidindo com elevada demanda atmosférica ($ET_o > 3 \text{ mm dia}^{-1}$). Os valores de K_e foram maiores que 0,4 para o tratamento com aspersão e cerca de 0,3 para o gotejamento. Os menores valores de K_e ocorreram na 3ª e 6ª séries, correspondente ao outono e inverno. Nessas avaliações, os valores de ET_o foram menores que 3 mm dia^{-1} e os de K_e foram menores que 0,3 para o tratamento irrigado por aspersão e aproximadamente igual a 0,2 para o gotejamento.

No tratamento com aspersão os valores de K_e foram ligeiramente maiores e podem ser atribuídos ao molhamento de toda a superfície do solo, o que favorecia as perdas por E. Ao contrário, a irrigação por gotejamento preconiza o molhamento somente na área sombreada da copa, próxima ao tronco da planta, diminuindo as perdas por E e resultando, por consequência, em menores valores de K_e .

Os valores de T também se comportaram de maneira diferenciada em todas as avaliações e tratamentos, variando de 1,14 a $3,45 \text{ mm dia}^{-1}$, 1,06 a $3,28 \text{ mm dia}^{-1}$ e 0,81 a $3,84 \text{ mm dia}^{-1}$ no tratamento irrigado por aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente (Figura 4.8, Tabela 4.2).

Os valores de T variaram em função dos tratamentos, da demanda da atmosfera, da evolução da área foliar e da fase fenológica. De maneira geral, os tratamentos irrigados apresentaram as maiores taxas de T. Isso se deve ao fato de que estes tratamentos, por receberem suplementação hídrica frequentemente, apresentaram armazenamento de água no solo sempre adequado (Figura 4.6), de tal forma que as plantas podiam extrair a água necessária para suprir a demanda transpiratória. Por outro lado, conforme observado na 1ª, 3ª e 6ª séries, o tratamento

não irrigado, por não receber suplementação hídrica em alguns períodos, apresentou T abaixo da medida para os tratamentos irrigados, evidenciando a restrição da planta à perda de água para a atmosfera. O mesmo efeito não aconteceu nas demais séries analisadas, quando todos os tratamentos apresentavam armazenamento de água no solo suficiente para atender a demanda atmosférica (Figura 4.6), ocorrendo taxas transpiratórias muito próximas entre os tratamentos.

Dentre os tratamentos irrigados, as taxas de T do tratamento irrigado por aspersão foram ligeiramente superiores às do gotejamento, embora os dois tratamentos apresentassem umidade do solo próxima à CC. Esse efeito pode ter ocorrido em decorrência de uma possível concentração do sistema radicular na zona do “bulbo molhado”, resultante da aplicação da água localizada, que pode ter restringido a absorção de água durante os picos de demanda atmosférica durante o dia, diminuindo T.

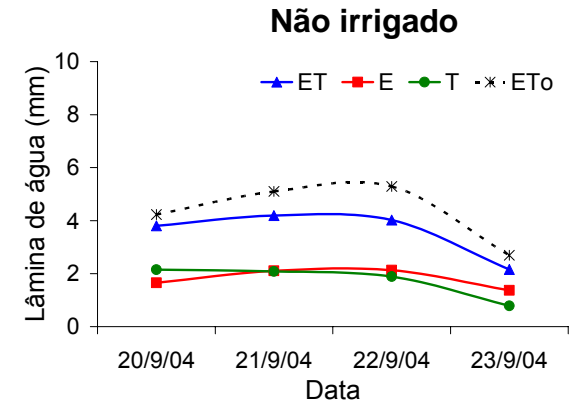
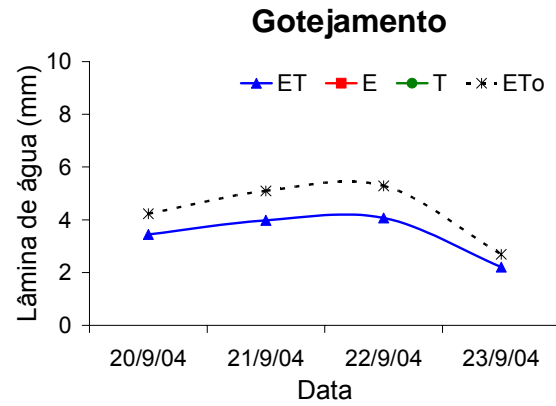
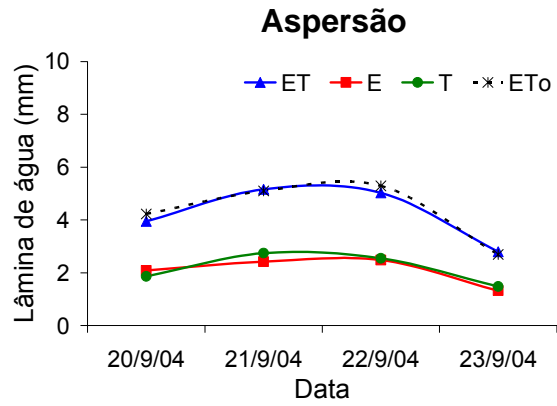
Os maiores valores de T, independente do tratamento, foram determinados durante o verão (2ª e 5ª séries). Nestes períodos, a alta demanda evaporativa, aliada aos altos valores de IAF (Figura 4.5B), bom suprimento hídrico (Figura 4.6) e intensa atividade fisiológica das plantas (CAMARGO; CAMARGO, 2001) foram determinantes para que ocorressem altas taxas transpiratórias.

Os menores valores de T ocorreram na 4ª série, determinados entre 20 e 23 de setembro de 2005. Neste período o valor médio de ETo foi de 3,05 mm dia⁻¹, enquanto ocorreram T de 1,14, 1,06 e 0,81 mm dia⁻¹ para os tratamentos com aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente. Os baixos valores de T em relação a ETo podem ser atribuídos ao baixo IAF (Figura 4.5B) e à menor atividade fisiológica dos cafeeiros que se encontravam no final da fase de dormência (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

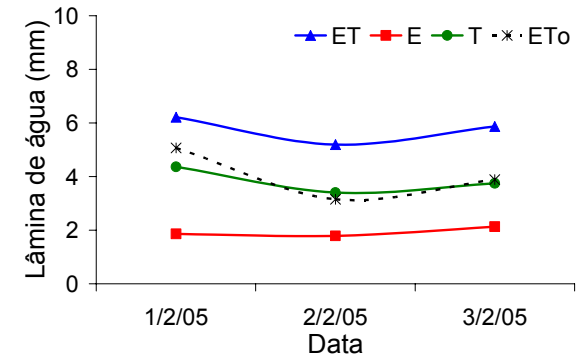
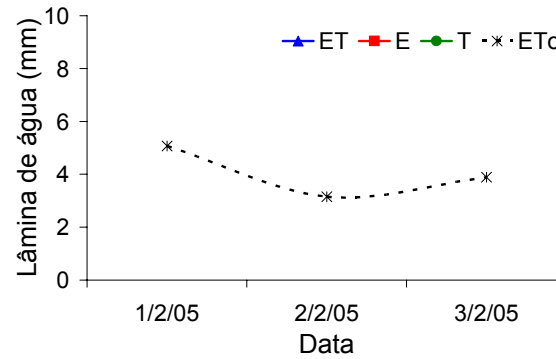
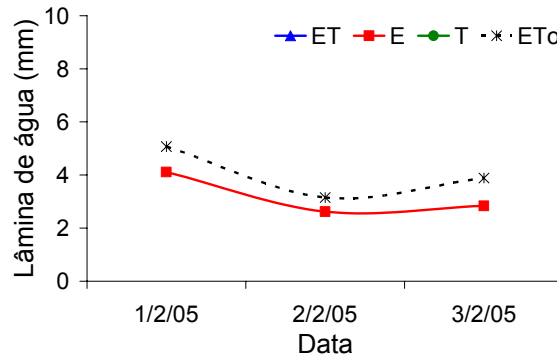
Os valores de Kcb foram determinados pelo comportamento de T, variando de 0,35 a 1,09 e 0,33 a 0,79, no tratamento irrigado por aspersão e gotejamento, respectivamente (Figura 4.9, Tabela 4.2). Em ambos os tratamentos, os maiores valores de Kcb foram encontrados na 3ª e 6ª séries, em condições de baixa demanda atmosférica (ETo < 3 mm dia⁻¹). Essa observação concorda com Barros e Maestri (1977), Rena e Maestri (1985), Carr (2001) e DaMatta (2004), que afirmam que a abertura estomática do cafeeiro para realização da fotossíntese e T é maior sob condições de baixa demanda atmosférica. Portanto, embora os valores de

IAF (Figura 4.5B) e a atividade fisiológica do cafeeiro (CAMARGO; CAMARGO, 2001) sejam maiores na primavera e verão, a razão T por ETo é mais acentuada no inverno. Marin et al. (2005) também observaram fenômeno semelhante, em que os valores de T ocorreram a taxas potenciais até a condição de ETo igual a 4 mm dia^{-1} , sendo que a partir daí os valores começaram a ser restringidos devido ao fechamento estomático.

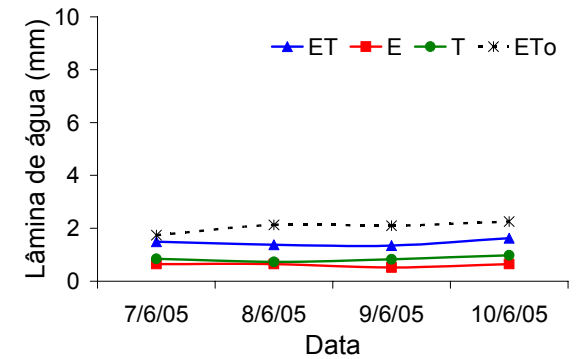
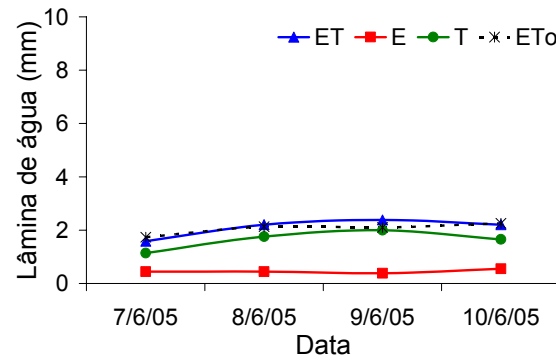
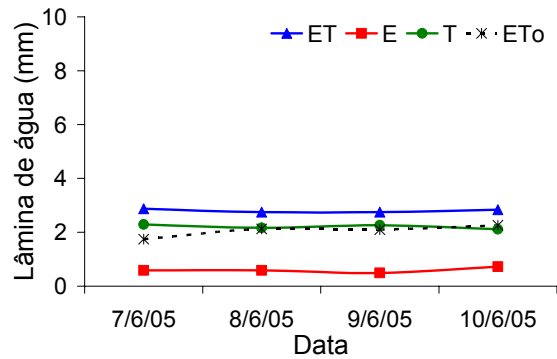
1ª série



2ª série



3ª série



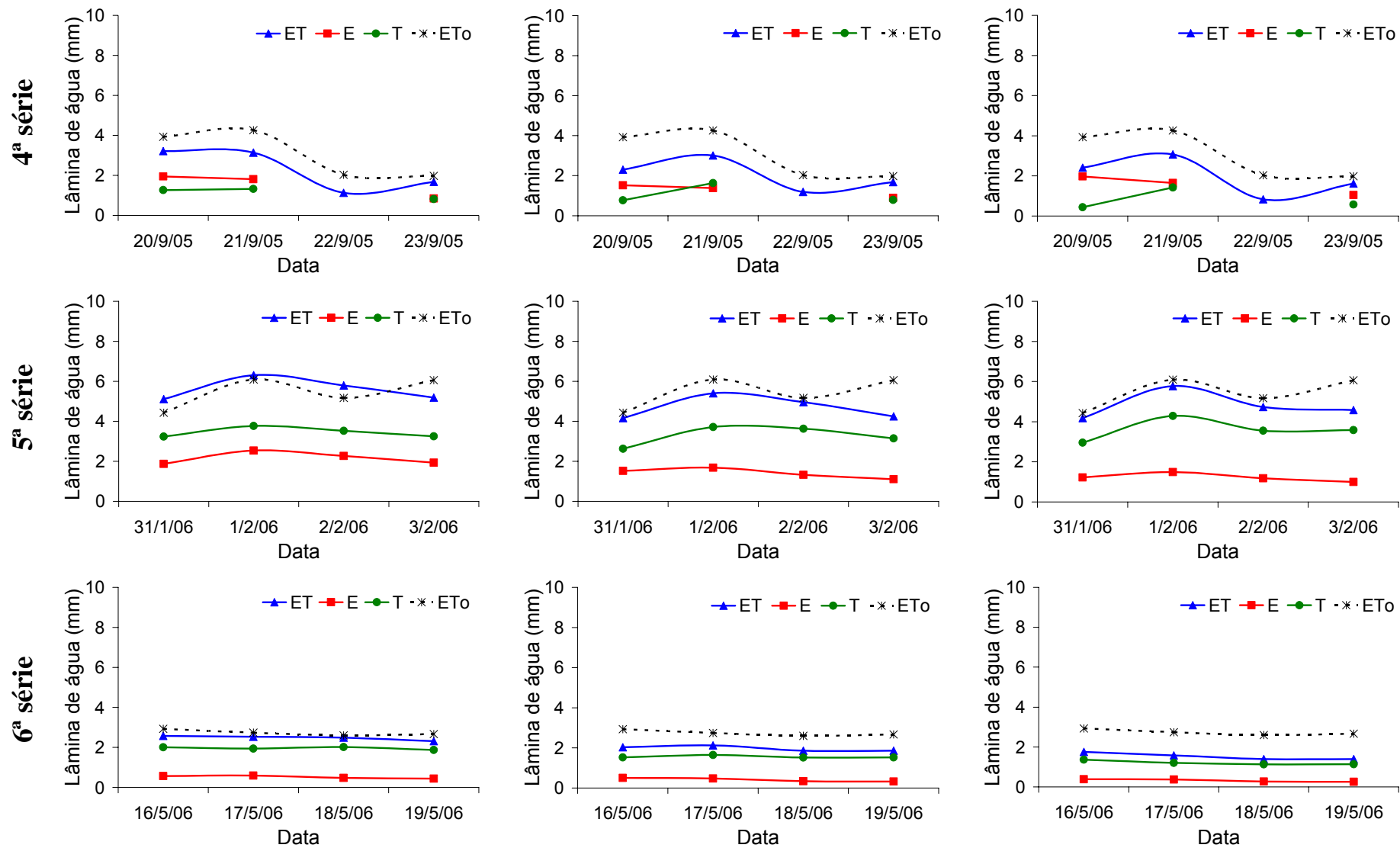
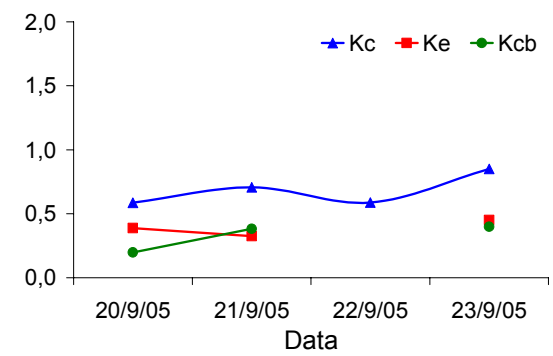
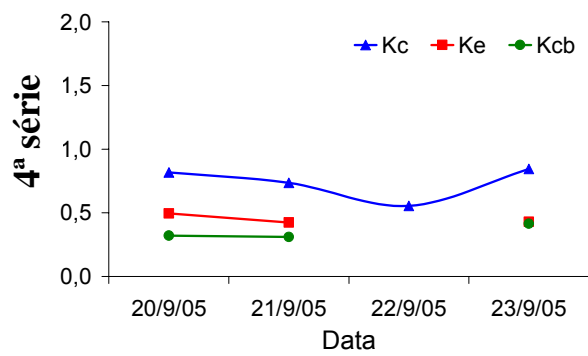
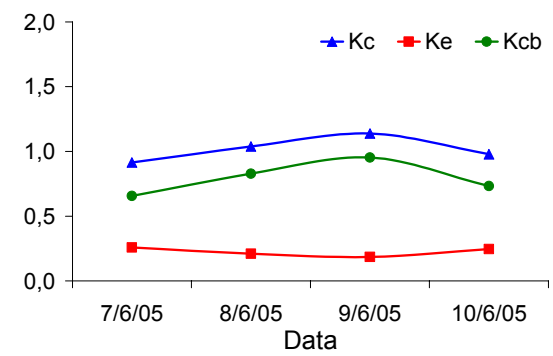
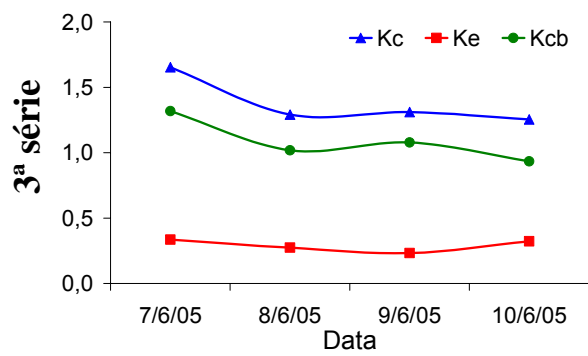
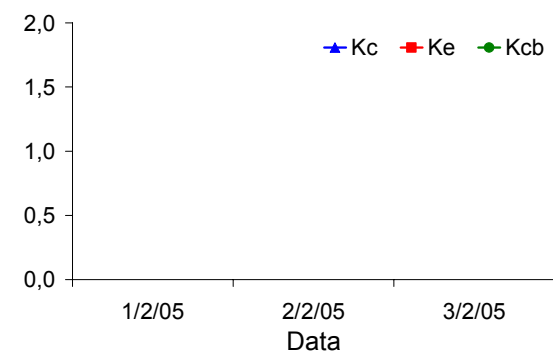
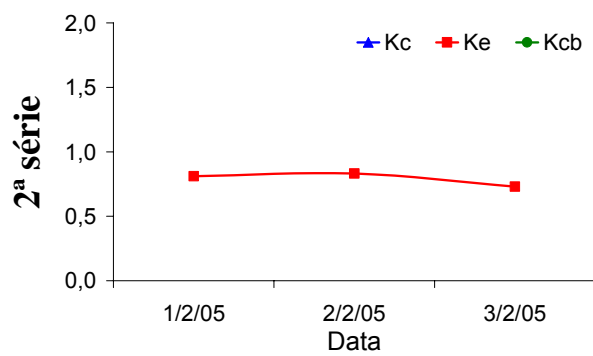
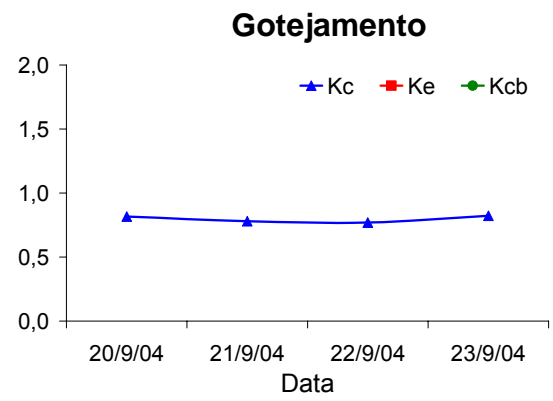
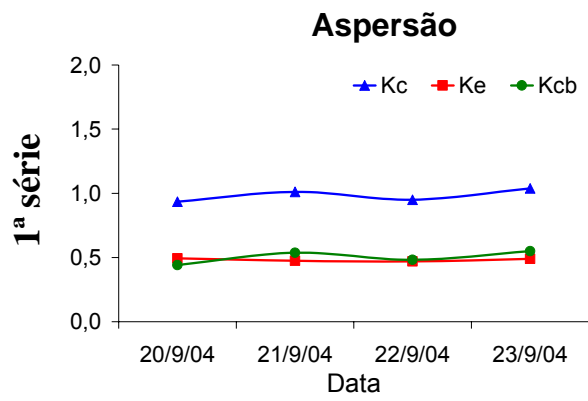


Figura 4.8. Evapotranspiração (ET), evaporação (E), transpiração (T) e evapotranspiração de referência (ETo) de cafeeiros irrigados por aspersão, gotejamento e não irrigado, em seis séries distintas durante a fase de produção em Londrina, PR.



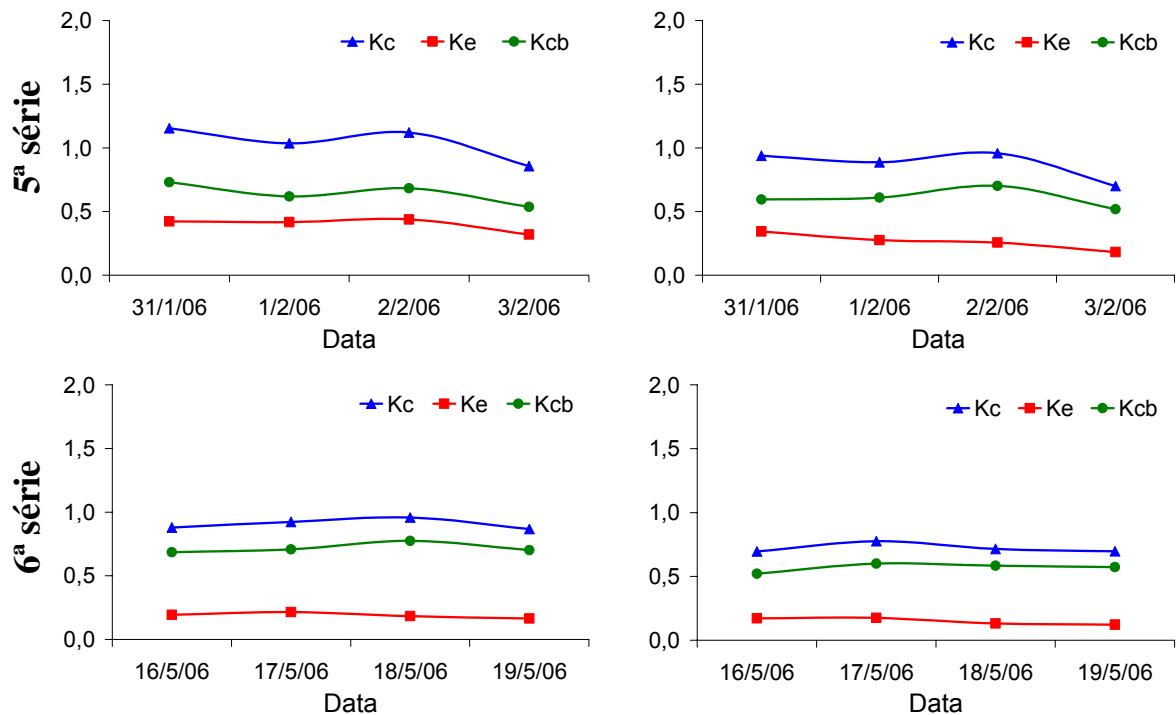


Figura 4.9. Coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) de cafeeiros irrigados por aspersão e gotejamento, determinados em seis séries distintas durante a fase de produção, em Londrina, PR.

Tabela 4.2. Médias de evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração (ET), evaporação (E), transpiração (T), coeficiente de cultivo simples (Kc), coeficiente de evaporação (Ke) e coeficiente de cultivo basal (Kcb) de cafeeiros irrigado por aspersão (A), gotejamento (G) e não irrigado (NI), determinados em seis séries distintas na fase de produção da lavoura em Londrina, PR.

Série	Período	ET _o	(mm dia ⁻¹)			Kc	Ke	Kcb	A	G
			A	G	NI					
1ª série	20/09 a 23/09/2004	4,33	ET	4,23	3,43	3,55	Kc	0,98	0,80	
			E	2,08	-	1,82	Ke	0,48	-	
			T	2,16	-	1,73	Kcb	0,50	-	
2ª série	01/02 a 03/02/2005	4,04	ET	-	-	5,76	Kc	-	-	
			E	3,19	-	1,92	Ke	0,79	-	
			T	-	-	3,84	Kcb	-	-	
3ª série	07/06 a 10/06/2005	2,06	ET	2,80	2,10	1,46	Kc	1,38	1,02	
			E	0,59	0,46	0,62	Ke	0,29	0,22	
			T	2,21	1,64	0,84	Kcb	1,09	0,79	
4ª série	20/09 a 23/09/2005	3,05	ET	2,29	2,05	1,98	Kc	0,74	0,68	
			E	1,54	1,27	1,55	Ke	0,45	0,39	
			T	1,14	1,06	0,81	Kcb	0,35	0,33	
5ª série	31/01 a 03/02/2006	5,44	ET	5,60	4,69	4,82	Kc	1,04	0,87	
			E	2,15	1,41	1,22	Ke	0,40	0,27	
			T	3,45	3,28	3,59	Kcb	0,64	0,61	
6ª série	16/05 a 19/05/2006	2,74	ET	2,48	1,97	1,53	Kc	0,91	0,72	
			E	0,52	0,41	0,32	Ke	0,19	0,15	
			T	1,96	1,56	1,21	Kcb	0,72	0,57	

Nos tratamentos com aspersão, gotejamento e não irrigado os valores de T representaram entre 43 e 79%, 46 e 79% e 34 e 79% os valores de ET respectivamente, enquanto que E compreendeu entre 21 e 57%, 21 e 54% e 21 e 66% os valores de ET, respectivamente. Gutierrez e Meinzer (1994) calcularam T sendo correspondente a 40 a 95% do valor de ET, quando o valor de IAF do cafeeiro irrigado por gotejamento aumentou de 1,4 para 6,7. No presente estudo, no tratamento sob aspersão, T correspondeu a 51% de ET quando a cultura apresentava IAF em torno de 5. Os valores de Kcb sugeridos por Allen et al. (1998) são maiores que os observados neste trabalho para cafeeiros irrigados por aspersão e gotejamento, com exceção dos valores encontrados na 3ª série.

Marin et al. (2005) encontraram valores médios de Ke igual a 0,24 e Kcb igual a 0,78 para cafeeiros irrigados por gotejamento aos cinco anos. Para o tratamento irrigado por aspersão deste estudo, o valor de Ke foi maior (0,43), enquanto que o valor de Kcb foi inferior (0,66). Para o tratamento irrigado por gotejamento, o valor de Ke foi bastante próximo (0,26), enquanto que o valor de Kcb foi inferior (0,58).

4.4. Conclusões

1. Os valores de ET e Kc dos tratamentos analisados variaram em função do regime hídrico (método de irrigação, frequência de chuvas e demanda da atmosfera), fase fenológica e evolução da área foliar do cafeeiro;
2. Durante a fase de produção da lavoura em Londrina, PR, o tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou os maiores valores médios anuais de ET (4,3 e 3,7 mm dia⁻¹ para o terceiro e quarto ano, respectivamente), seguido do gotejamento (3,7 e 3,1 mm dia⁻¹) e do não irrigado (3 e 2,7 mm dia⁻¹);
3. O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (1,3 e 1,1 para o terceiro e quarto ano, respectivamente) e menor para o irrigado por gotejamento (1,22 e 1);
4. Os valores de E e Ke variaram em função da demanda da atmosfera e dos métodos de irrigação, enquanto T e Kcb variaram em função da demanda da atmosfera, dos métodos de irrigação, fase fenológica e evolução da área foliar do

cafeeiro;

5. Nos tratamentos irrigados por aspersão, gotejamento e não irrigado os valores de E representaram entre 21 e 57%, 21 e 54% e 21 e 66% os valores de ET, enquanto T representou entre 43 e 79%, 46 e 79% e 34 e 79% os valores de ET, respectivamente;
6. Os valores de Ke variaram de 0,19 a 0,79 e 0,15 a 0,39, enquanto os valores de Kcb variaram de 0,35 a 1,09 e 0,33 a 0,79, no tratamento irrigado por aspersão e gotejamento, respectivamente.

5 CONCLUSÕES GERAIS

1. Os valores de ET e Kc de cafeeiros em fase de formação e produção variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera, fase fenológica e evolução da área foliar;
2. O tratamento irrigado por aspersão foi o que apresentou os maiores valores médios anuais de ET (3,1 e 3,4 mm dia⁻¹ para a fase de formação e 4,3 e 3,7 mm dia⁻¹ para a fase de produção), seguido do gotejamento (2,9 mm dia⁻¹ para o segundo ano e 3,7 e 3,1 mm dia⁻¹ para a fase de produção) e do não irrigado (2,2 e 2,5 mm dia⁻¹ para a fase de formação e 3 e 2,7 mm dia⁻¹ para a fase de produção);
3. O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (0,99 e 1,03 para a fase de formação e 1,3 e 1,1 para a fase de produção) e menor para o irrigado por gotejamento (0,92 para o segundo ano e 1,22 e 1,1 para a fase de produção);
4. Os valores de E e Ke variaram em função da demanda da atmosfera e do método de irrigação, enquanto T e Kcb variaram em função da demanda da atmosfera, do método de irrigação, da fase fenológica e da evolução da área foliar;
5. Os valores de E representaram entre 21 e 57%, 21 e 54% e 21 e 66% os valores de ET, enquanto T representou entre 43 e 79%, 46 e 79% e 34 e 79% os valores de ET nos tratamentos irrigados por aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente;
6. Os valores de Ke variaram de 0,19 a 0,79 e 0,15 a 0,39, enquanto os valores de Kcb variaram de 0,35 a 1,09 e 0,33 a 0,79, no tratamento irrigado por aspersão e gotejamento, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 39)

ALÈGRE, G. Climats et caféiers d'Arabie. **L'Agronomie Tropicale**, Paris, v.14, n.1, p.23-58, 1959.

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.112, n.4, p.348-368, 1986.

ALLEN, R. G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculation software. Version 2.0. Moscow: University of Idaho, 2000. CDROM.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)

ALLEN, S. J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in Northern Syria. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.49, n.4, p.291-309, 1990.

ANTUNES, R. C. B.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C.; RENA, A. B.; ALVARENGA, A. P. Determinação da evapotranspiração da cultura do cafeeiro em formação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: Embrapa Café/MINASPLAN, 2000. v.2, p.810-813.

ARRUDA, F. B.; IAFEE, 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. **Anais...** Brasília: Embrapa Café/MINASPLAN, 2000. v.2, p.790-793.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611p.

BOAST, C. W.; ROBERTSON, T. M. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.4, p.689-696, 1982.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.1, p.65-68, 2001.

CANNELL, M. G. R. Physiology of the coffee crop. In.: CLIFFORD, M. N.; WILSON, K. C. (Org.). **Coffee: Botany, biochemistry, and production of beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p.108-134.

CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.37, n.1, p. 1-36, 2001.

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

DAAMEN, C. C.; SIMMONDS, L. P.; WALLACE, J. S.; LARYEA, K. B.; SIVAKUMAR, M. V. K. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.65, n.3-4, p.159-173, 1993.

DaMATTA, F. M. Fisiologia do cafeeiro em sistemas arborizados. In.: MATSUMOTO, S. N. (Org.). **Arborização de cafezais no Brasil**. Vitória da Conquista: Edições UESB, 2004. p.87-118.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 33)

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2nd ed. Rome: FAO, 1977. 156p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24)

DUGAS, W. A.; UPCHURCH, D. R.; RITCHIE, J. T. A weighing lysimeter for evapotranspiration and root measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, n.5, p.821-825, 1985.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1999. 412p.

EVETT, S. R.; WARRICK, A. W.; MATTHIAS, A. D. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, n.2, p.329-336, 1995.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p.237-242, 2006.

FARIA, R. T.; CARAMORI, P. H. Caracterização físico-hídrica de um Latossolo Roxo distrófico do município de Londrina, PR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.12, p.1303-1311, 1986.

FAZUOLI, L. C.; THOMAZIELLO, R. A.; CAMARGO, M. B. P. Aquecimento global, mudanças climáticas e a cafeicultura paulista. **O Agrônomo**, Campinas, v.59, n.1, p.19-20, 2007.

FLUMIGNAN, D. L.; ADAMI, M.; FARIA, R. T. Área foliar de folhas íntegras e danificadas de cafeeiro determinada por dimensões foliares e imagem digital. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5., 2007, Águas de Lindóia. **Anais...** Brasília: Embrapa Café, 2007. CDROM.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. Teste de um microlisímetro para medição da evaporação do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. CDROM.

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.652-657, 1994.

HATFIELD, J. L. Methods of estimating evapotranspiration. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Org.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p.435-474. (Agronomy 30)

HOWELL, T. A.; McCORMICK, R. L.; PHENE, C. J. Design and installation of large weighing lysimeters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.28, n.1, p.106-117, 1985.

IAPAR. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina, IAPAR, 1994. 49p. (Documento 18)

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/defaulttab.sh>>. Acesso em: 10 jan. 2008.

IPCC. **Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability**. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm>. Acesso em: 15 jan. 2008.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 70)

KANG, S. Z.; GU, B. J.; DU, T. S.; ZHANG, J. H. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.59, n.3, p.239-254, 2003.

KRUSE, E. G.; BUCKS, D. A.; von BERNUTH, R. D. Comparison of irrigation systems. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Org.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p.475-508. (Agronomy 30)

KUMAR, D. Some aspects of the physiology of *Coffea arabica* L.: A review. **Kenya Coffee**, Nairobi, v.44, n.519, p.9-47, 1979.

LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.20, n.1, p.120-125, 1956.

MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Coffee. In.: ALVIM, P. T.; KOZLOWSKI, T. T. (Org.). **Ecophysiology of tropical crops**. New York: Academic Press, 1977. p.249-278.

MANTOVANI, E. C. A irrigação do cafeeiro. **Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n.48, p.34-41, 2000.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; RIGHI, E. Z. ; SENTELHAS, P. C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in southern Brazil. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.41, n.2, p.187-197, 2005.

MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUZA, F. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.107-110, 1999.

- NUNES, M. A.; BIERHUIZEN, J. F.; PLOEGMAN, C. Studies on productivity of coffee. I. Effect of light, temperature and CO₂ concentration on photosynthesis of *Coffea arabica*. **Acta Botanica Neerlandica**, Amsterdam, v.17, n.2, p.93-102, 1968.
- ORGAZ, F.; FERNÁNDEZ, M. D.; BONACHELA, S.; GALLARDO, M.; FERERES, E. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.72, n.2, p.81-96, 2005.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.
- RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.11, n.126, p.26-40, 1985.
- RIGHI, E. Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, Piracicaba.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v.8, n.5, p.1204-1213, 1972.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore, 1996. 146p.
- SINCLAIR, T. R. Theoretical considerations in the description of evaporation and transpiration. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Org.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p.343-361. (Agronomy 30)
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.
- TANNER, C. B. Factors affecting evaporation from plants and soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.12, n.?, p.221-227, 1957.

TYAGI, N. K.; SHARMA, D. K.; LUTHRA, S.K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.45, n.1, p.41-54, 2000.

VILLALOBOS, F. J.; FERERES, E. Evaporation measurements beneath corn, cotton and sunflower canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, n.6, p.1153-1159, 1990.

WALKER, G. K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.63, n.?, p.137-141, 1983.

WALTER, I. A.; ALLEN, R. G.; ELLIOTT, R.; JENSEN, M. E.; ITENFISU, D.; MECHAM, B.; HOWELL, T. A.; SNYDER, R.; BROWN, P.; ECHINGS, S.; SPOFFORD, T.; HATTENDORF, M.; CUENCA, R. H.; WRIGHT, J. L.; MARTIN, D. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 4., 2000, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: American Society of Agricultural Engineers, 2000. p.?-?.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.108, n.2, p.57-74, 1982.

WRIGHT, J. L. Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTER, I. A.; JENSEN, M. E. (Org.). **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**: Proceedings of the International Symposium on Lysimetry. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p.191-199.

WRIGLEY, G. **Coffee**. New York: Longman Scientific and Technical, 1988. 639p.