

ADJALMA CAMPOS DE FRANÇA NETO

ANÁLISE DE MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ESTIMATIVA DA ET_0 E DA
SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DO CÁLCULO DA LÂMINA DE
IRRIGAÇÃO PARA A CULTURA DO CAFÉ

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Agrícola,
para obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

ADJALMA CAMPOS DE FRANÇA NETO

ANÁLISE DE MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ESTIMATIVA DA ETo E DA
SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DO CÁLCULO DA LÂMINA DE
IRRIGAÇÃO PARA A CULTURA DO CAFÉ

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Agrícola,
para obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

APROVADA EM: 10 de setembro de 2003.

Prof. Gilberto C. Sedyama
(Conselheiro)

Prof. Brauliro G. Leal
(Conselheiro)

Prof. Salassier Bernardo

Prof. Mauricio Bernardes Coelho

Prof. Everardo Chartuni Mantovani
(Orientador)

A Deus.
Aos meus pais Hokney França e Maria Neide França.
Aos meus irmãos e às minhas irmãs.

AGRADECIMENTO

A Deus, que não me abandona.

À minha família, pelo apoio infinito; e aos meus irmãos Hokney, Hokneide e Valéria e à minha sobrinha Bia, pelo incentivo constante, principalmente nos momentos mais difíceis.

À Flávia, minha namorada, pelo amor, otimismo e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade e por ter ministrado os conhecimentos necessários à realização do Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa do Café (PND&P/Café), por ter financiado este trabalho.

Ao Professor Everardo Chartuni Mantovani, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela confiança e pela orientação.

Ao coordenador do Curso de Meteorologia Agrícola do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Agrícola, Professor Aristides Ribeiro, pela confiança, orientação e amizade.

Aos Professores conselheiros Gilberto C. Sedyama e Brauliro G. Leal, pela colaboração e pela assistência durante os trabalhos.

Ao engenheiro agrícola Marco Belo, pela ajuda no entendimento dos cálculos e pela amizade.

A todos os funcionários e professores do DEA, em especial a Marcos Heil, Luís Cláudio Costa, Sérgio Zolnier, Haroldo Fernandes, Lucimar Silva Rezende e Galinari, pelos ensinamentos e pela oportunidade da convivência.

A todos os meus amigos, principalmente aqueles que permaneceram nas horas de desânimo, em especial ao meu mestre e amigo Marcos Brito, Sal, Condinho, Junior, Gambá, Rodes, Touche, Vibrião, Faisal, Gringo, Enaldo, Samuel, Mário Alfredo, Paulão, Renato Carioca, Irmãos Chendes, Saulão, Nem, Nau, Marshal, Leandro, Daian, Zinato, Zé Luis, Fúlvio, Magrão, Marlos, Gustavo Hadad, Bruno Moura, André, André Tequila, Marconi, Mudrik, Marcos, Ricardo, Fernando, Alexandro, Nelsinho, Cléia, Guilherme, Zé Luiz, Silvia, Modesto, Mônica, Ana Paula, Takech, Giri, Arlindo e a todos que trazem a energia positiva da vida, pelo companheirismo e pela convivência.

BIOGRAFIA

ADJALMA CAMPOS DE FRANÇA NETO, filho de Hokney de Moraes França e Maria Neide dos Santos França, nasceu na cidade de Porto Velho, RO, em 29 de agosto de 1975.

Em 1994, iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), concluindo-o em outubro de 2000.

Em novembro de 2000, iniciou o Curso de Especialização em Manejo de Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da UFV, concluindo-o em agosto de 2001.

Em agosto desse mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola da UFV, área de concentração em Manejo de Irrigação, submetendo-se à defesa de tese em setembro de 2003.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1	5
COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) PARA AS PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE CAFÉ	5
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	8
2.1. Irrigação da cultura do café	8
2.2. Evapotranspiração.....	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)	13
3.2. Comparação entre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
4.1. Análise comparativa dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)	20
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	44

	Página
CAPÍTULO 2	46
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EQUAÇÃO DE OBTENÇÃO DA LÂMINA BRUTA DE ÁGUA PARA PROJETO DE IRRIGAÇÃO	46
1. INTRODUÇÃO	46
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	50
2.1. Considerações gerais.....	50
2.2. Fatores que influenciam a lâmina de água para irrigação.....	52
2.2.1. Profundidade do sistema radicular	52
2.2.2. Fator de esgotamento (f)	52
2.2.3. Estimativa da evapotranspiração da cultura (ET _c)	53
2.2.4. Evapotranspiração da cultura ajustada em função da variação da umidade do solo (k _s) e da localização de aplicação da água (k _l)	54
3. MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1. Considerações gerais.....	57
3.2. Lâmina bruta de irrigação.....	60
3.2.1 Evapotranspiração de referência (ET _o)	61
3.2.2. Coeficiente de cultura (K _c).....	61
3.2.3. Coeficiente de estresse hídrico (K _s)	62
3.2.4. Coeficiente de localização (K _l).....	63
3.3. Análise de sensibilidade.....	64
3.3.1. Teoria fundamental da análise de sensibilidade.....	64
3.3.2. Procedimento para obtenção das derivadas parciais dos componentes da equação de aquisição da lâmina bruta de irrigação para projeto.....	67
3.4. Determinação do erro relativo das variáveis independentes.....	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1. Coeficientes de sensibilidade relativa da lâmina bruta (L _B) para projeto de irrigação em relação às variáveis analisadas.....	71
4.2. Determinação da variação do erro relativo, decorrente do uso de metodologias de determinação das variáveis presentes no modelo de determinação da LB.....	74

	Página
4.3. Análise da sensibilidade relativa da L_B à evapotranspiração de referência (ET_o).....	75
4.4. Análise da sensibilidade relativa da L_B ao coeficiente de estresse hídrico do solo (K_s).....	76
4.5. Análise da sensibilidade relativa da L_B ao coeficiente de localização (K_l).....	77
4.6. Análise da sensibilidade relativa da L_B à umidade atual de água no solo (U_a).....	77
4.7. Análise da sensibilidade relativa da L_B à percentagem de área sombreada (P_s).....	78
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

RESUMO

FRANÇA NETO, Adjalma Campos de, M. S., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2003. **Análise de métodos simplificados de estimativa da ETo e da sensibilidade das variáveis do cálculo da lâmina de irrigação para a cultura do café.** Orientador: Everardo Chartuni Matovani. Conselheiros: Gilberto C. Sedyama e Brauliro G. Leal.

A determinação da evapotranspiração de referência (ETo) é um parâmetro básico de extrema importância para a definição das necessidades hídricas das culturas e do momento da irrigação. No manejo desta são necessárias informações meteorológicas que permitam estimar, com maior nível de precisão, a evapotranspiração das culturas. A utilização de estações meteorológicas automáticas nem sempre é possível em propriedades agrícolas em razão do seu elevado custo inicial e da infra-estrutura necessária, tornando o uso de estações simplificadas que medem temperatura e precipitação uma das únicas opções viáveis. Nesse caso não é possível o emprego da metodologia-padrão de Penman-Monteith, sendo necessário o uso de outros métodos mais simples e menos precisos. Este trabalho constituiu-se de duas etapas. A primeira teve como objetivos: a) a avaliação e calibração da evapotranspiração de referência (ETo) de dois métodos simplificados, Hargreaves-Samani (HS) e Blaney-Cridle-FAO (BC-FAO), ao método-padrão (Penman-Monteith); e a realização de ajustes para otimização dos métodos

simplificados, gerando informações importantes para suporte ao manejo de irrigação nas principais regiões produtoras de café do país. Ainda na primeira etapa, os resultados das estimativas foram obtidos em função dos dados climáticos disponíveis de cada localidade em estudo, com o auxílio do software IRRIGA. As cidades de interesse para o estudo foram selecionadas de acordo com a representatividade das características da região entre os principais centros produtores de café: Cerrado, Leste, Sul e Zona da Mata de Minas Gerais, Oeste e Sudoeste da Bahia, sendo as cidades escolhidas Araguari, Patrocínio, Caratinga, Lavras, Varginha e Viçosa, em Minas Gerais; e Vitória da Conquista e Barreiras, na Bahia. Os sistemas de plantio foram separados em dois grupos: lavouras mecanizadas e lavouras não-mecanizadas. Em todas as localidades, a equação de Hargreaves & Samani se ajustou melhor à equação de Penman-Monteith, sendo esta a recomendável para o manejo da irrigação em condições de limitação de disponibilidade de dados climáticos. A segunda etapa teve o objetivo de promover uma análise de sensibilidade da lâmina bruta de irrigação aos componentes do modelo. E a utilização do método de Hargreaves & Samani para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) foi o parâmetro que apresentou maior coeficiente de sensibilidade relativa (S_r), de 0,60. O erro na utilização desse método com relação ao método-padrão transferiu um erro médio compreendido entre 3,10 e 3,90%, variando de acordo com a combinação com outros parâmetros necessários à determinação da lâmina bruta, como: coeficiente de estresse hídrico (K_s), coeficiente de localização (K_l), coeficiente de cultura (K_c) e a eficiência de aplicação do sistema. O coeficiente de localização (K_l) apresentou 0,5 como valor médio do coeficiente de sensibilidade (S_r); porém, devido à discrepância entre os valores dos dois métodos utilizados (Keller e Fereres) para o cálculo do K_l, os erros médios transferidos alcançaram valores de até 17,80%.

ABSTRACT

FRANÇA NETO, Adjalma Campos de, M. S., Universidade Federal de Viçosa, September 2003. **Analysis of simplified methods for the estimation of ETo and the sensitivity of variables used for the calculation of irrigation depth levels of coffee crop.** Adviser: Everardo Chartuni Matovani. Committee members: Gilberto C. Sedyama and Brauliro G. Leal.

The determination of reference evapotranspiration (ETo) is a basic parameter of key importance for the definition of the crop water requirements and the moment of irrigation. For its management, meteorological information is requisite, which allows an estimation of the crop evapotranspiration with a higher level of precision. On farms, the use of automatic weather stations is not always possible due to the high initial costs and necessary infra-structure. The use of simplified stations to measure temperature and precipitation is the only viable option. In this case, the use of the Penman-Monteith standard methodology is not possible, and other, more simple and less precise methods must be applied. The study was realized in two stages. The first had the objectives: a) evaluation and calibration of the referential evapotranspiration (ETo) of two simplified methods, Hargreaves-Samani (HS) and Blaney-Cridle-FAO (BC-FAO), to the standard method (Penman-Monteith); adjustments for an optimization of the simplified methods, bringing forth important information to support the irrigation management in the main coffee-producing regions of the

country. As another part of the first stage, the estimate results were obtained based on the available climatic data of each study site, with help of the software IRRIGA. Cities of interest for our study were selected from among the main coffee-producing centers according to the representativeness of regional characteristics: Cerrado, East, South, and Zona da Mata in the State of Minas Gerais, West and Southwest of the State of Bahia. The selected cities were Araguari, Patrocínio, Caratinga, Lavras, Varginha, and Viçosa, Minas Gerais; and Vitória da Conquista and Barreiras, Bahia. The cultivation systems were divided in the two groups: mechanized and non-mechanized plantations. At all locations, the Hargreaves & Samani equation adjusted best to the Penman-Monteith equation. Therefore, this one is recommended for irrigation management under a limited availability of climatic data. In the second stage, an analysis of sensitivity of the gross irrigation depth level to the model compounds was carried out. Furthermore, the parameter that presented the highest coefficient of relative sensitivity (S_r) of 0.60 was obtained by the use of the Hargreaves & Samani method for the determination of the referential evapotranspiration (E_{To}). This method's results, compared to those of the standard method, presented a mean error between 3.10 and 3.90%, varying according to the combination with other parameters required for the determination of the gross depth level, such as: coefficient of the hydric stress (K_s), coefficient of localization (K_l), crop coefficient (K_c), and application efficiency of the system. The coefficient of localization (K_l) presented 0,5 as mean value of the sensitivity coefficient (S_r); however, due to the discrepancy between the values of the two applied methods (Keller and Fereres) for the calculation of K_l , the mean transferred errors attained values of up to 17,80%.

INTRODUÇÃO

O café é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, que se destaca como o maior produtor mundial. É um dos mais importantes produtos agrícolas de exportação, desempenhando a função de gerador de empregos e divisas para o País e incentivando a fixação do homem no campo. Grande esforço vem sendo envidado para aumentar a produtividade e a rentabilidade da atividade cafeeira, com ênfase na pesquisa científica.

Produto de exportação, o café representa para 30% dos países produtores mais da metade da arrecadação total com exportações e, para o restante, cerca de 25%. Dados de 1997 e 1998 indicam que, embora a produção ocorra em grande número de países, 10 deles produziram 74% do total e seis demandaram 70% do café comercializado no mundo. A cafeicultura tem seus dois maiores produtores situados na América do Sul: Brasil (com 22,4% da produção e 23,1% da exportação mundial em 1998) e Colômbia (com 11,4% da produção e 14% das exportações) (CAIXETA, 1999).

A expressão do potencial de crescimento e rendimento da cultura do café é dependente de fatores climáticos, edáficos e biológicos. Assim, uma combinação ideal dessa tríade é fundamental para que seja atingida a máxima produtividade.

Conforme CAMARGO (1989), regiões com elevada deficiência hídrica, acima de 200 mm anuais, poderão ser inaptas à cafeicultura, e nesse caso as regas são praticamente indispensáveis para a consecução de bons

rendimentos. Vários autores verificaram a eficiência da irrigação na produção e crescimento do cafeeiro (ARAÚJO, 1982; SANTINATO et al., 1989; ZANINI et al., 1994; REIS et al., 1990; ANTUNES et al., 2000). Mesmo naquelas regiões consideradas aptas, porém onde ocorrem os chamados veranicos nos períodos considerados críticos para a cultura, o uso da irrigação suplementar evita danos à cultura e perdas na produção.

Segundo MATIELLO (1991) e BONOMO (1999), diferentes regiões de plantio têm apresentado deficiência hídrica no período de frutificação do cafeeiro. Dentre essas regiões, podem-se destacar as áreas de cerrado no Triângulo Mineiro e em zonas contíguas de Minas Gerais e Goiás, regiões cafeeiras do Nordeste, norte do Espírito Santo, extremo sul da Bahia e algumas áreas em São Paulo. Nessas regiões, a prática da irrigação tem resultado em bom retorno, com aumentos significativos de produtividade.

Um dos aspectos que possibilitou o avanço da cafeicultura irrigada foi a disponibilidade de sistemas de irrigação mais modernos a preços cada vez mais competitivos. BONOMO (1999) comentou que, devido à ausência de resultados de pesquisa, a implantação e, principalmente, o manejo dos sistemas de irrigação têm sido realizados de forma empírica e desordenada, havendo a necessidade de se estudarem o real benefício dessa prática e as melhores alternativas de sistema de irrigação e manejo. Entretanto, nos últimos anos, vem sendo realizado um grande avanço nas pesquisas científicas, com a obtenção de resultados que auxiliam os produtores no manejo adequado da irrigação, com ganhos de produtividade (MANTOVANI, 2000).

A falta de água para a cultura do café em determinados estádios do ciclo de produção pode causar danos irreparáveis às plantas e prejuízos à produção e à qualidade final do produto. No entanto, vários estudos apontam que o estresse hídrico é necessário no estágio de dormência da planta, no qual esta armazena reservas nutricionais enquanto o ambiente se encontra desfavorável para a sua reprodução. Na presença de um ambiente propício ocorrem a quebra de dormência e a indução ao florescimento.

O uso consuntivo da água pela cultura é representado pela evapotranspiração da cultura no sistema solo-planta-ambiente. Toma-se essencial a quantificação, com o máximo de fidelidade, da água a ser aplicada

às culturas, sendo o fator básico para o planejamento, dimensionamento e manejo adequado da irrigação.

Para o cafeeiro, uma estimativa precisa do consumo de água é de grande importância, pois um suprimento inadequado de água poderá reduzir substancialmente seu crescimento sem que ocorram murcha ou outros sinais visíveis de déficit hídrico. No entanto, crescimento reduzido significa que poucos nós estarão formados para floração e subsequente produção de frutos (GUTIÉRREZ e MEINZER, 1994).

Vários sistemas de irrigação podem ser utilizados em cafezais, como a irrigação localizada por gotejamento e microaspersão, irrigação por aspersão convencional, autopropelido, pivô central e sistemas simplificados com mangueiras simples ou perfuradas. Na escolha desses sistemas, devem ser considerados principalmente o custo dos equipamentos, os gastos operacionais, a disponibilidade e qualidade da água e o uso alternativo da irrigação (BONOMO, 1999).

Nos últimos anos, tem-se observado uma tendência crescente para a utilização de modelos, dos mais simples aos mais sofisticados, que representem o sistema de produção agrícola, descrevendo os processos físicos e biológicos por meio de equações matemáticas. Os modelos sumarizam o conhecimento científico de acordo com sua especificidade, possibilitando o manejo da irrigação com base numa melhor compreensão sobre as relações solo-planta-água-atmosfera (COSTA, 1997). Portanto, o emprego de métodos de estimativa da evapotranspiração e práticas de manejo que permitam maior eficiência no uso da água é meta imprescindível para a cafeicultura moderna.

A estimativa de possíveis erros na determinação da lâmina bruta de irrigação pode ser avaliada por meio de uma análise de sensibilidade relativa, aplicada a cada um dos componentes do modelo.

Diante do exposto, o capítulo 1 deste trabalho se dedica à avaliação, nas condições das principais regiões produtoras de café do País: Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Sul, Leste e Zona da Mata de Minas Gerais, Oeste e Sudeste da Bahia, das distintas metodologias para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), que diferem entre si no nível de complexidade e na quantidade de dados de entrada. Para isso, foram comparados os valores de ET_o determinados pelo método de Penman-Monteith, tido como padrão, com

os valores estimados pelos seguintes métodos: Hargreaves & Samani e Blaney – Criddle FAO.

Já o capítulo 2 teve como objetivo principal a análise de sensibilidade dos componentes do modelo em relação à lâmina bruta de irrigação. Como objetivo específico, foi analisado um método simplificado de estimativa de evapotranspiração de referência, Hargreaves & Samani, obtendo-se o erro máximo relativo à sua utilização no modelo de determinação da lâmina bruta para projeto de irrigação.

CAPÍTULO 1

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) PARA AS PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE CAFÉ

1. INTRODUÇÃO

Com a globalização do mercado e problemas relacionados à escassez dos recursos hídricos, tornaram-se fundamentais a implantação e a manutenção de sistemas de irrigação com base na eficiência e otimização do uso da água, buscando minimizar os danos ao meio ambiente. Nesse contexto, é essencial a determinação da quantidade da água que se encontra disponível no solo, o que constitui um dos principais temas de pesquisas que visam melhorar o manejo e o planejamento da irrigação.

A demanda evaporativa de água pelo ar atmosférico é um parâmetro básico para se conhecer a quantidade da água utilizada pela planta. Esse processo reflete o uso consultivo da água pela cultura, porém essa quantificação não é simples, devido à complexidade dos processos envolvidos na dinâmica da água no sistema solo-planta-ambiente. O consumo de água nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura é representado pela evapotranspiração da cultura (ET_c), que é o somatório da evaporação direta da água do solo mais a transpiração das plantas, e serve de informação básica

para um manejo racional da irrigação, que por conseqüência, reduz os custos de produção.

Na literatura, há um grande número de métodos que visam estimar o consumo de água pelas culturas, os quais estão divididos em dois grupos: os diretos e os indiretos. O primeiro grupo trata da determinação diretamente na área de cultivo, em geral feita por meio de diferentes tipos de lisímetros ou parcelas experimentais, onde se realiza o balanço hídrico. O segundo grupo se refere ao uso de evaporímetros e de métodos empíricos (MANTOVANI, 1993).

O método mais comumente empregado para estimativa das necessidades hídricas das culturas é baseado na estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc). Esse processo de estimativa é dividido em duas etapas, em que na primeira se estima a evapotranspiração de uma cultura de referência, geralmente utilizando um método empírico, enquanto na segunda a ETc é obtida ao multiplicar-se ETo por um coeficiente de cultura que integra as características da cultura e do clima (DOORENBOS e PRUITT, 1977). Para a obtenção da evapotranspiração da cultura, usam-se coeficientes de correção, como: coeficiente para condição de irrigação localizada (KI), coeficiente para disponibilidade hídrica do solo (Ks) e coeficientes de cultura (Kc) para cada estágio de desenvolvimento da planta.

SMITH (1991) e ALLEN et al. (1998 – FAO Irrigation and Drainage Paper 56) propuseram um novo conceito para cultura de referência e, por conseguinte, para ETo. A evapotranspiração de referência passou a ser definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica nem nutricional (ótimas condições de desenvolvimento), com altura média de 0,12 m, albedo 0,23 e resistência da superfície de 70 s.m⁻¹. O modelo utilizado como padrão para estimar a ETo passou a ser a equação de Penman-Monteith parametrizada. O método de Penman-Monteith foi selecionado porque estimou o valor da ETo aproximado do valor da ETo da grama no local avaliado e também porque tem base física, incorporando explicitamente tanto os parâmetros fisiológicos quanto os aerodinâmicos.

No Brasil, a disponibilidade de informações meteorológicas é reduzida, principalmente para o pequeno e médio produtores agrícolas, o que é ocasionado pelo reduzido número de estações da rede nacional e pelo alto

custo das estações automáticas em nível de propriedade. A falta de dados locais necessários para o cálculo da ET_0 é uma limitação ao uso do método-padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0). Torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias simplificadas que visem à melhor forma de emprego e ajuste de métodos com menor exigência de dados climáticos, de fácil obtenção e de baixo custo, como as equações de Blaney-Criddle-FAO e Hargreaves & Samani, que necessitam apenas das temperaturas máxima e mínima e possuem alto potencial de utilização em campo.

Diante do exposto, realizou-se o presente estudo com os objetivos de estimar e comparar a evapotranspiração de referência (ET_0) por meio de dois métodos simplificados ao método-padrão (Penman-Monteith) e da realização de ajustes para otimização dos métodos simplificados, determinando-se aqueles que melhor se ajustam às condições locais, gerando informações importantes para suporte ao manejo da irrigação nas principais regiões produtoras de café.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação da cultura do café

Já na década de 40 os estudiosos da cultura do café no Brasil observaram a existência de uma correlação positiva entre as produções dos cafezais e a precipitação ocorrida nos cinco meses mais secos, geralmente de maio a setembro.

Observa-se uma grande expansão das fronteiras cafeeiras brasileiras, que apresenta alta demanda de informações técnicas relacionadas à produção, visando a um aumento no lucro, na produtividade e na agregação de qualidade ao produto final sem se esquecer, contudo, da preservação da natureza (MANTOVANI, 1998).

Segundo MANTOVANI (2000), a cafeicultura irrigada ocupa cerca de 10% da área plantada com café, havendo levantamentos preliminares que estimam cerca de 200.000 ha de café irrigado, principalmente no Espírito Santo, em Minas Gerais e na Bahia.

A ocorrência de estiagens estacionais e deficiências hídricas acentuadas na fase de frutificação ou formação do grão afetam o crescimento deste; se ocorrerem na fase de granação, quando os grãos estão se solidificando internamente, estes poderão ficar chochos ou malgranados (SANTINATO et al., 1996; RENA e MAESTRI, 2000; MATIELLO, 1991). Nessas condições, o

emprego da irrigação tem resultado em bom retorno, com aumentos significativos na produção.

A falta de água na cultura do café em determinados estádios do ciclo de produção pode causar danos irreparáveis às plantas e prejuízos à produção e qualidade final do produto. No entanto, vários estudos apontam que o estresse hídrico é necessário no estágio de dormência da planta, no qual esta armazena reservas nutricionais enquanto o ambiente se encontra desfavorável para a sua reprodução. Com o ambiente propício há a quebra de dormência e a indução ao florescimento. Tornam-se, então, imprescindíveis irrigações que suplementem, nos períodos críticos, a água necessária (MATIELLO et al., 1995).

Para o cafeicultor, a irrigação é uma prática que, além de incrementar a produtividade, pode proporcionar a obtenção de um produto de melhor qualidade e a garantia de bons preços no mercado. Estudos que auxiliem técnicos e agricultores nas tomadas de decisões, como investir ou não em um sistema de irrigação e, ou, estimar como, quando e quanto irrigar para se obter a máxima receita líquida com a cafeicultura, tornam-se, a cada dia, mais necessários (SOUZA, 2001).

Segundo SANTINATO et al. (1996), sem a prática da irrigação nas áreas onde o déficit hídrico chega a comprometer a produção o País deixaria de produzir de 2,0 a 2,5 milhões de sacas de café beneficiado por ano.

2.2. Evapotranspiração

Numerosos métodos têm sido desenvolvidos e testados no intuito de quantificar a necessidade hídrica das culturas, e eles vão desde métodos mais simples, que requerem apenas dados de temperatura mensal como dado de entrada, até os mais complexos, que envolvem modelos físicos, requerendo uma base de dados de entrada mais completa (HATFIELD e ALLEN, 1996).

Segundo MANTOVANI (1997), a determinação da evapotranspiração da cultura permite definir a quantidade de água utilizada, possibilitando a identificação do momento de irrigar e a lâmina de água necessária.

SMITH et al. (1991) redefiniram ETo como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência do dossel da

cultura de 70 s.m^{-1} e albedo de 0,23, além de terem considerado a equação de Penman-Monteith como um dos métodos mais apropriados para estimativa da E_{To} , recomendando-a como padrão internacional. Além disso, ALLEN et al. (1994a) apresentaram considerações teóricas e práticas, no intuito da adoção do novo conceito da cultura de referência proposta por Monteith em 1965.

DOORENBOS e PRUITT (1977) evidenciaram a interação dos componentes climáticos envolvidos no processo de evapotranspiração das culturas. A caracterização feita por CHANG (1971) expressa a ordem de importância dos elementos meteorológicos, sendo de 80:6:14 a relação entre o saldo de radiação, a umidade relativa e a velocidade do vento, respectivamente, evidenciando-se o principal efeito do saldo da radiação solar. A radiação solar direta e, de uma forma menor, a temperatura do ar ambiente fornecem essa energia. A força-motriz para remover o vapor de água da superfície evaporante está na diferença entre a pressão do vapor da água na superfície evaporante e do ar circunvizinho. Como o processo de evaporação é contínuo, esse ar é gradualmente saturado, e o processo reduzirá a velocidade e pode parar se o ar úmido não for transferido à atmosfera. A substituição do ar saturado por ar mais seco é altamente dependente da velocidade do vento. Outros fatores, como características da cultura e manejo, são elementos que também afetam a evaporação e a transpiração (ALLEN et al., 1998).

Dentre os modelos teóricos e empíricos, destacam-se os de Penman-FAO, Penman-Monteith, FAO-radiação, FAO-Blaney-Cridde, Thornthwaite modificado por Camargo, Hargreaves, Priestley-Taylor e outros, que utilizam dados de temperatura, de umidade relativa, de insolação, de velocidade do vento e de radiação, entre outros, além de variáveis da cultura, por exemplo a resistência estomática e a resistência aerodinâmica (JENSEN et al., 1990). A aplicação de determinado modelo depende da disponibilidade de informações climáticas e da precisão de cada uma para as condições específicas de uso.

Segundo MELLO (1998), alguns modelos apresentam quantidade expressiva de elementos climáticos envolvidos em sua estrutura, ocasionando dificuldades na sua utilização, visto que poucos países dispõem, em toda a sua extensão territorial, de estações equipadas o suficiente para fornecerem todos os elementos necessários à aplicação de certo modelo.

De acordo com BONOMO (1999), é de grande importância o conhecimento dos métodos mais simples de estimativa da evapotranspiração que demandam dados de fácil obtenção e de baixo custo, porém com confiabilidade local razoável para a adoção de um manejo adequado de irrigação.

O método de Penman-Monteith-FAO, por ser uma equação com fundamentação física abrangente, apresenta uso limitado no Brasil, pois se restringe a locais com disponibilidade de informações meteorológicas completas, ou seja, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar.

Apesar do grande desenvolvimento alcançado pelas estações meteorológicas, principalmente as automáticas, tanto do ponto de vista de facilidades operacionais quanto de seu preço final, ainda existem limitações na disponibilidade de dados meteorológicos completos em nível de fazenda, que garantam suporte ao manejo da irrigação. Nesse caso, o emprego de métodos de estimativa da ETo, baseados apenas na temperatura do ar, pode ser uma opção satisfatória para um grande número de propriedades.

Os métodos baseados na temperatura do ar têm sido freqüentemente usados devido à simplicidade dos cálculos e por exigirem poucos dados de entrada. Outro fato importante na aplicação desses métodos consiste na facilidade de obtenção dos dados, para o que se utiliza apenas um termômetro de temperaturas máxima e mínima do ar. Como as propriedades produtoras de café são constituídas, em sua maioria, de pequenas áreas, a utilização desses métodos ajustados e com certas restrições pode gerar valores de evapotranspiração aceitáveis.

A confiabilidade da estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), pelo método simplificado, depende do seu grau de aproximação com o valor estimado pelo método-padrão, Penman-Monteith, ou seja, depende da correlação entre esses dois métodos. Contudo, a confiabilidade de recomendação da irrigação é altamente dependente dos trabalhos de calibração, que permitam definir níveis críticos para as estimativas de ETo e a quantidade de água a ser aplicada no solo para se obter o máximo de eficiência.

Do ponto de vista estatístico, a calibração é um método de análise em que, em uma fase inicial, se determina o valor de uma variável dependente em função de uma variável independente (regressão) e, depois, em uma segunda fase, o valor desta última variável é estimado após se conhecer, ou definir, o valor da variável dependente.

Dentre os métodos que utilizam temperatura, destacam-se as equações de Hargreaves & Samani e Blaney-Criddle-FAO. Tais métodos podem apresentar correções locais de caráter diário, semanal, mensal ou sazonal que também podem afetar a precisão da estimativa do método. Entretanto, o primeiro método superestima a ETo e o segundo a subestima em locais de clima úmido, segundo observaram JENSEN et al. (1990) e AMATYA et al. (1995).

De acordo com Costa (1998), citado por ANTUNES (2000), a utilização de uma forma concisa e objetiva, do conhecimento disponível sobre o efeito das variações climáticas de longo prazo e das variações meteorológicas de curto prazo nas atividades agrícolas é fundamental para o entendimento e planejamento do sistema produtivo.

BONOMO et al. (1998), utilizando dados climatológicos diários de seis estações meteorológicas para estimativa da ETo na região do Triângulo Mineiro, concluíram que os métodos de Thornthwaite modificado por Camargo e de Hargreaves e Samani apresentaram nítida tendência para subestimação e superestimação, respectivamente, em relação ao método de Penman-Monteith, conseqüentemente necessitando de fatores de ajuste local.

A equação de Blaney-Criddle-FAO foi inicialmente recomendada para valores mensais. ALLEN e PRUITT (1986) afirmaram que é possível a utilização em base diária quando os coeficientes de correção do método são definidos também em base diária. Para Viçosa, MG, trabalho de MANTOVANI (1994) indicou excelentes resultados para o método de Blaney-Criddle-FAO, sendo o que estimou melhor a Eto, comparativamente ao de Penman-Monteith. Uma questão que deve ser considerada é que utilização de fatores de correções locais implicam a necessidade de outras informações meteorológicas além da temperatura. Nesse caso, seria importante avaliar essa diferença de precisão quando se utiliza o fator de correção médio (normais climatológicas) ou valores diários (umidade relativa, velocidade do vento e horas diárias de insolação).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

As estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) foram realizadas com base numa série de dados climáticos diários (1961 a 1978) das estações localizadas nas regiões de estudo, cedidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e contidas no banco de dados climáticos do software IRRIGA. Foram selecionadas as estações meteorológicas que atendem às características climáticas das determinadas regiões, bem como a série mínima de dados disponíveis (5 anos), com o máximo de representatividade.

As regiões de interesse da pesquisa foram escolhidas de acordo com os sistemas de cultivo de cada região, que são influenciados por características como: relevo, espaçamento, condições socioeconômicas e tecnológicas e tipos de solo e clima, entre outros. Dividiu-se o estudo em dois grupos: cultivo mecanizado e cultivo manual. Essa classificação abrange aspectos básicos, como: plantio, tratos culturais e colheita. O primeiro grupo (Grupo A) foi constituído das seguintes cidades: Araguari, Patrocínio e Barreiras, representando o Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Oeste da Bahia, respectivamente.

O segundo grupo (Grupo B) foi formado pelas seguintes regiões e cidades: Zona da Mata mineira (Viçosa), Leste e Sul de Minas Gerais (Caratinga, Lavras, Varginha) e Sudeste da Bahia (Vitória da Conquista). As

estações meteorológicas selecionadas constam nos Quadros 1 e 2, respectivamente, constituindo os grupos A e B, com as devidas coordenadas geográficas, período de dados climáticos mínimo e altitudes.

Quadro 1 – Localização, coordenadas geográficas e número de anos de dados disponíveis para o Grupo A

Grupo A – Lavouras Mecanizadas				
Local	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Altitude (Metros)	Nº Anos de Dados
Araguari	18°38'	48°11'	921	12
Barreiras	12°09'	44°59'	452	20
Patrocínio	18°56'	46°59'	965	12

Quadro 2 – Localização, coordenadas geográficas e número de anos de dados disponíveis para o Grupo B

Grupo B – Cultivo Manual				
Local	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Altitude (Metros)	Nº Anos de Dados
Caratinga	19°47'	42°08'	578	8
Lavras	21°15'	45°00'	920	40
Vitória da Conquista	14°52'	40°50'	923	16
Varginha	21°33'	45°25'	916	14
Viçosa	20°45'	42°52'	648	32

Os valores da evapotranspiração de referência (ET_o) foram obtidos em função dos dados climáticos disponíveis de cada localidade em estudo, com o auxílio do módulo de simulação do software IRRIGA.

Os dados climatológicos diários disponíveis para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) foram: temperaturas máxima e mínima do ar, horas de brilho solar, temperaturas do bulbo seco e do bulbo molhado, umidade relativa média diária do ar e velocidade média do vento.

Os métodos utilizados para estimativa dos valores da ET_o, comparação e posterior calibração foram os seguintes: Penman-Monteith parametrizado pela FAO, 1998, considerado como padrão; e Hargreaves & Samani e Blaney-Criddle-FAO, métodos simplificados, com menor exigência de dados climáticos (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS e PRUITT, 1977; JENSEN et al., 1990). Os valores de ET_o foram calculados em médias diárias para o período de um ano.

Método de Hargreaves & Samani (HS)

HARGREAVES e SAMANI (1985), em estudos realizados em Davis, Califórnia (clima semi-árido), utilizando dados obtidos em lisímetros com grama, desenvolveram o seguinte método, quando houve somente a disponibilidade de dados de temperatura local para estimar a ET_o diária (mm d⁻¹):

$$ET_0 = 0,0023 Q_o (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} (T_{méd} + 17,8) \quad (1)$$

em que:

ET₀ = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

Q_o = radiação extraterrestre, em mm.d⁻¹;

T_{máx} = temperatura máxima, em °C;

T_{mín} = temperatura mínima, em °C; e

T_{méd} = temperatura média diária = 0,5 (T_{máx} - T_{mín}).

Este método deve ser calibrado para as condições climáticas locais. ALLEN et al. (1998) comentaram que, normalmente, o método provoca superestimativas em condições de clima úmido.

Método de Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO)

Originalmente desenvolvido para regiões semi-áridas dos Estados Unidos, este método sofreu inúmeras modificações, ao longo do tempo, para adaptação a outras condições climáticas. Sua versão mais utilizada foi proposta por DOORENBOS e PRUITT (1977), que consideraram a utilização de correções locais em função do clima.

Para o cálculo do ajuste local, a proposta original envolveu o uso de nomogramas. Diversas propostas surgiram para facilitar a utilização dos fatores de correção, sendo a mais utilizada a de FREVERT et al. (1983), que será empregada neste trabalho para comparação com a proposta inicial. Segue-se a descrição do método de Blaney-Criddle-FAO com as correções propostas.

$$ET_0 = a + b p (0,46 T + 8,13) \quad (2)$$

$$a = 0,0043 UR_{\min} - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (3)$$

$$b = a_0 + a_1 UR_{\min} + a_2 \frac{n}{N} + a_3 Ud + a_4 UR \min \frac{n}{N} + a_5 UR_{\min} Ud \quad (4)$$

sendo:

$T_{\text{méd}}$ = temperatura média mensal, em °C;

UR_{\min} = umidade relativa mínima (%);

N/N = razão de insolação; e

U_d = média da velocidade para o período diurno, em ms^{-1} .

Os coeficientes da regressão a_i de Frevet obtidos por Cuenca (1987) são: $a_0 = 0,82$, $a_1 = -0,0041$, $a_2 = 1,07$, $a_3 = 0,066$, $a_4 = -0,0060$ e $a_5 = -0,00060$.

p = porcentagem do total de fotoperíodo mensal sobre o total do fotoperíodo anual (mensal / anual).

Método de Penman-Monteith-FAO (PM)

Além de incorporar os aspectos aerodinâmico e termodinâmico, este método inclui a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor da água e a resistência da superfície à transferência de vapor d'água. É recomendado pela FAO como método-padrão (ALLEN et al., 1998) para estimativa da ETo, descrita como:

$$ET_0 = \frac{0,408(Rn - G) + g \frac{900}{T + 273} U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + g(1 + 0,34U_2)} \quad (5)$$

em que:

- ET₀ = evapotranspiração de referência, MJ m⁻² d⁻¹;
- Rn = saldo de radiação à superfície, MJ m⁻²d⁻¹;
- T = temperatura do ar a 2 m de altura, °C;
- G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻²d⁻¹;
- U₂ = velocidade do vento à altura de 2 m, m s⁻¹;
- e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;
- e_a = pressão de vapor atual do ar, kPa;
- (e_s - e_a) = déficit de pressão de vapor, kPa;
- Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação, kPa °C⁻¹;
- γ* = constante psicrométrica modificada, kPa°C⁻¹; e
- γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

3.2. Comparação entre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo)

A comparação foi feita entre os métodos que estimam a evapotranspiração de referência, utilizando-se uma quantidade reduzida de dados de entrada, Hargreaves & Samani e Blaney-Cridlley-FAO, e que melhor se ajustam aos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith, método-padrão. Os valores de ETo foram analisados para o período de um ano, em

valores diários médios. Foram ajustadas as equações de regressão, utilizando-se uma planilha de cálculo.

Os métodos simplificados foram comparados com o método-padrão. O método ideal seria aquele que apresenta, por um lado, a média das estimativas iguais à média obtida com o método-padrão e uma correlação (r^2) igual a 1. Para isso, ao se estimar a regressão linear ($Y = a_0 + a_1X$) entre o método-padrão (X) e o método simplificado (Y), a_0 seria igual a 0 e a_1 igual a 1.

Na prática isso não ocorre, pois as médias são diferentes entre si, a_0 é diferente de 0 e a_1 é diferente de 1. O importante não é obter r^2 significativo a 1%, mas que a_0 tenda para 0 e a_1 e r^2 tendam para 1, visto que não se quer unicamente interpretar os resultados de uma pesquisa, mas, também, utilizar essa relação com a finalidade de predizer a estimativa “correta” da evapotranspiração de referência em função do valor estimado pelo método-padrão.

A equação de regressão ajustada foi da seguinte forma:

$$Y = a_0 + a_1X \quad (6)$$

em que:

X = ETo estimada pelo método-padrão (PM);

Y = ETo estimada para cada um dos outros métodos avaliados; e

a_0 e a_1 = parâmetros da equação de regressão.

Para comparação e análise dos resultados, foram utilizados os critérios propostos por JENSEN et al. (1990), seguindo-se procedimentos empregados por MANTOVANI (1993) e BONOMO (1999), que envolvem o erro percentual, o erro-padrão de estimativa (SEE), o erro-padrão de estimativa ajustado (SEEA) e o coeficiente de ajuste das equações lineares completas e forçadas pela origem, bem como os respectivos coeficientes de determinação (r^2) e o intervalo de confiança dos estimadores dos parâmetros das equações. A seguir é apresentada a Equação 7:

$$SEE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Yp_i - Ymet_i)^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad (7)$$

em que:

- SEE = erro-padrão da estimativa, mm d⁻¹;
- Yp = ETo estimada pelo método-padrão (PM), mm d⁻¹;
- Ymet = ETo estimada pelo método a ser avaliado, mm d⁻¹; e
- n = número de observações.

Determinou-se o SEEa empregando a mesma Equação 22, porém o valor da ETo estimada pelo método a ser avaliado (Ymet) foi substituído pelo da ETo recalculada a partir da equação ajustada, ou seja, Ymet' igual a X.

A base de comparação entre os modelos foi feita comparando os valores do erro-padrão da estimativa (SEE), do erro-padrão de estimativa ajustado pela regressão (SEEa), do coeficiente de determinação (r²) e dos coeficientes linear (a₀) e angular (a₁) das respectivas regressões. A melhor alternativa foi aquela que apresentou maior (r²), menores SEE e SEEa, a₀ próximo de 0 e a₁ próximo de 1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise comparativa dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

As análises feitas se referem à comparação de dois métodos simplificados, Hargreaves & Samani e Blaney-Cridley-FAO, com o método-padrão Penman-Monteith FAO (1998), baseada nos valores médios diários estimados de ET_o no período de um ano, pelos três métodos nas diferentes regiões. A partir das comparações, fez-se o ajuste de cada método avaliado, determinando aquele que apresentou melhor adequação ao método-padrão para cada região.

Os locais de estudo foram divididos em dois grupos: lavouras mecanizadas (Araguari, Barreiras e Patrocínio) e lavouras com sistema manual de cultivo (Caratinga, Lavras, Varginha, Vitória da Conquista e Viçosa). Os valores de ET_o foram expressos em base diária e obtidos por meio de simulações, feitas pelo programa IRRIGA, utilizando-se a série histórica de dados meteorológicas contidos no banco de dados do IRRIGA, para as diferentes localidades.

Observa-se, na Figura 1 e nos Quadros 3 e 4, que a cidade de Barreiras (Grupo A) foi a que apresentou maiores temperaturas em médias mensal (27 °C) e máxima (34,2 °C) no mês de setembro. Varginha e Lavras (Grupo B) foram as que tiveram as menores temperaturas médias mensais no mês de julho (16,97 °C).

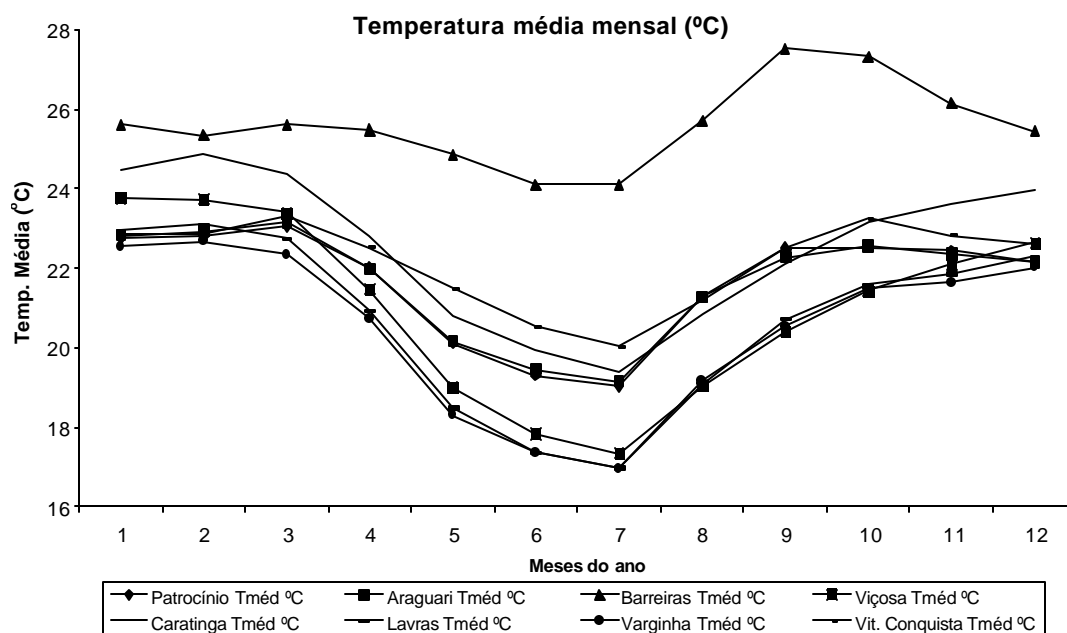


Figura 1 – Representação do comportamento da temperatura média mensal durante o ano, em todos os locais do estudo.

Quadro 3 – Valores mensais das temperaturas média ($T_{méd}$), máxima ($T_{máx}$) e mínima ($T_{mín}$) dos locais estudados, com a produção mecanizada (Grupo A)

CRUPO A (Lavouras Mecanizadas)									
Mês	Patrocínio-MG			Araguari-MG			Barreiras-BA		
	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C	T _{méd} °C
Jan.	22,7	27,2	17,5	22,8	27,4	17,4	25,6	31,3	19,6
Fev.	22,8	27,4	17,7	22,9	27,7	17,6	25,4	31,0	19,8
Mar.	23,1	27,8	17,5	23,1	27,9	17,4	25,6	31,4	19,6
Abr.	22,0	26,7	16,1	22,0	26,7	16,0	25,5	31,4	19,2
Mai.	20,1	24,9	13,6	20,2	25,1	13,6	24,9	31,1	17,2
Jun.	19,3	24,3	12,6	19,5	24,5	12,6	24,1	30,8	14,9
Jul.	19,0	24,3	12,0	19,1	24,5	12,1	24,1	31,1	13,9
Ago.	21,3	26,9	13,5	21,3	26,9	13,5	25,7	32,9	14,4
Set.	22,5	27,8	15,3	22,3	27,6	15,1	27,5	34,3	17,2
Out.	22,5	27,3	16,2	22,6	27,4	16,1	27,3	33,6	19,8
Nov.	22,4	26,9	16,8	22,4	26,8	16,6	26,1	31,8	19,8
Dez.	22,1	26,5	16,9	22,2	26,5	16,8	25,4	31,0	19,5

Quadro 4 – Valores mensais das temperaturas médias ($T_{méd}$), máximas ($T_{máx}$) e mínimas ($T_{mín}$) dos locais estudados, com a produção manual (Grupo B)

GRUPO B (Lavouras Não-Mecanizadas)															
Mês	Viçosa-MG			Caratinga-MG			Lavras -MG			Varginha-MG			Vitória da Conquista-MG		
	$T_{méd}$	$T_{máx}$	$T_{mín}$	$T_{méd}$	$T_{máx}$	$T_{mín}$	$T_{méd}$	$T_{máx}$	$T_{mín}$	$T_{méd}$	$T_{máx}$	$T_{mín}$	$T_{méd}$	$T_{máx}$	$T_{mín}$
Jan.	23,8	28,8	17,7	24,5	28,8	19,1	22,9	26,6	17,2	22,5	27,3	17,1	22,9	27,6	17,2
Fev.	23,7	28,8	17,8	24,9	29,6	19,5	23,1	27,0	17,2	22,7	27,5	17,2	22,9	27,7	17,4
Mar.	23,4	28,6	17,1	24,4	29,2	18,8	22,7	27,9	16,5	22,3	27,3	16,4	23,3	28,2	17,5
Abr.	21,5	26,5	15,1	22,8	27,7	17,0	21,0	27,9	14,4	20,7	25,8	14,5	22,5	27,2	16,9
Mai.	19,0	24,6	11,8	20,8	26,0	14,2	18,5	27,4	11,2	18,3	23,8	11,2	21,5	25,8	15,2
Jun.	17,8	23,9	10,1	19,9	25,5	12,8	17,3	25,7	9,6	17,4	23,2	9,9	20,5	24,7	14,0
Jul.	17,3	23,6	9,8	19,4	25,1	12,3	17,0	23,8	8,9	17,0	23,0	9,3	20,0	24,4	13,3
Ago.	19,0	25,4	10,4	20,8	26,4	13,3	19,1	23,3	10,3	19,2	25,4	10,8	21,2	25,9	13,7
Set.	20,4	26,0	13,1	22,1	27,3	15,9	20,7	23,8	12,8	20,5	26,1	13,0	22,5	27,5	15,4
Out.	21,4	26,2	15,7	23,2	27,7	17,9	21,6	25,8	15,0	21,5	26,5	15,2	23,2	28,1	16,8
Nov.	22,1	26,6	16,8	23,6	27,6	18,7	21,9	26,6	15,7	21,6	26,4	15,8	22,8	27,6	17,4
Dez.	22,6	27,2	17,4	24,0	28,1	18,8	22,3	26,7	16,6	22,0	26,5	16,6	22,6	27,3	17,2

Os valores médios da evapotranspiração de referência (ET_o) de cada mês, estimada pelos três métodos em questão para todos os locais, estão apresentados no Quadro 5, e os valores máximos e mínimos do Grupo A encontram-se no Quadro 6 e os do Grupo B, nos Quadros 7 e 8.

O menor valor ET_o foi de $1,39 \text{ mm.d}^{-1}$, estimado pelo método de Blaney-Cridlley-FAO, no mês de julho, em Viçosa, e o valor máximo de ET_o foi estimado pelo método de Hargreaves & Samani ($6,3 \text{ mm.d}^{-1}$), no mês de setembro, para a cidade de Barreiras. Verificou-se que os picos máximos de evapotranspiração nas regiões de estudo, de forma geral, foram observados no período de setembro a abril e os menores, entre os meses de maio e agosto, coincidindo com os períodos de maiores e menores precipitações, respectivamente. No Quadro 9, apresentam-se as médias diárias das precipitações mínimas mensais dos dois grupos (A e B), com 50% de probabilidade de ocorrência.

Quadro 5 – Valores médios de ETo (mm.d⁻¹) estimados pelos três métodos analisados: Penman-Monteith (ET_{0-PM}), Blaney-Cridley (ET_{0-BC}) e Hargreaves & Samani (ET_{0-Harg}) (Grupos A e B)

GRUPO A (Lavouras Mecanizadas)												
Araguari-MG												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
ET _{0-PM}	4,41	4,43	4,16	3,60	2,99	2,72	3,03	4,08	4,37	4,43	4,15	3,94
ET _{0-BC}	3,10	3,07	2,99	2,86	2,74	2,73	2,99	3,80	3,50	3,26	2,95	2,76
ET _{0-Harg}	5,05	4,91	4,58	3,78	3,06	2,71	2,90	3,83	4,58	4,96	4,96	4,92
Barreiras-BA												
ET _{0-PM}	4,79	4,61	4,59	4,13	3,73	3,61	4,01	4,96	5,62	5,11	4,78	4,61
ET _{0-BC}	3,54	3,22	3,30	3,21	3,42	3,73	4,26	5,14	5,30	4,21	3,68	3,47
ET _{0-Harg}	5,55	5,39	5,25	4,70	4,25	4,08	4,43	5,49	6,30	6,11	5,64	5,48
Patrocínio-MG												
ET _{0-PM}	4,39	4,40	4,16	3,60	2,97	2,68	3,00	4,07	4,46	4,45	4,20	3,96
ET _{0-BC}	3,07	3,03	2,99	2,88	2,75	2,72	2,98	3,83	3,61	3,28	3,01	2,78
ET _{0-Harg}	4,96	4,81	4,52	3,75	3,01	2,66	2,85	3,81	4,61	4,92	4,99	4,89
GRUPO B (Lavouras Não-Mecanizadas)												
Caratinga-MG												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
ET _{0-PM}	4,51	4,69	4,09	3,14	2,40	2,02	2,16	3,03	3,52	3,76	4,00	4,12
ET _{0-BC}	3,23	3,39	2,98	2,40	2,10	2,00	2,03	2,65	2,70	2,68	2,83	2,93
ET _{0-Harg}	5,24	5,17	4,68	3,77	3,08	2,75	2,89	3,67	4,32	4,69	4,84	5,06
Varginha-MG												
ET _{0-PM}	4,29	4,22	3,92	3,18	2,37	1,94	2,15	3,07	3,72	3,96	4,23	4,14
ET _{0-BC}	2,93	2,85	2,76	2,48	2,14	1,93	2,07	2,74	2,92	2,79	2,93	2,84
ET _{0-Harg}	5,17	4,96	4,50	3,61	2,85	2,49	2,67	3,61	4,38	4,83	5,06	5,07
Viçosa-MG												
ET _{0-PM}	4,58	4,44	3,97	3,06	2,25	1,78	1,97	2,86	3,28	3,56	3,87	4,08
ET _{0-BC}	3,27	3,11	2,83	2,31	1,91	1,62	1,73	2,39	2,43	2,43	2,66	2,86
ET _{0-Harg}	5,50	5,25	4,76	3,74	3,00	2,64	2,75	3,68	4,37	4,66	4,90	5,09
Vitória da Conquista-MG												
ET _{0-PM}	4,78	4,72	4,82	4,05	3,63	3,34	3,50	4,62	5,25	5,01	4,52	4,53
ET _{0-BC}	3,49	3,37	3,57	3,12	3,06	2,92	3,02	3,90	4,12	3,73	3,27	3,32
ET _{0-Harg}	5,02	4,90	4,71	3,92	3,27	2,88	3,05	3,87	4,64	5,03	4,92	4,91
Lavras-MG												
ET _{0-PM}	4,17	4,28	3,75	3,08	2,26	1,87	2,10	2,95	3,54	3,99	4,10	3,92
ET _{0-BC}	2,80	2,91	2,65	2,34	2,00	1,84	2,03	2,62	2,70	2,82	2,83	2,66
ET _{0-Harg}	5,02	4,93	4,11	3,34	2,75	2,40	2,56	3,40	4,00	4,77	4,96	4,96

Quadro 6 – Valores máximos e mínimos de ETo (mm.d⁻¹), Penman-Monteith (ET_{0-PM}), Blaney-Cridley (ET_{0-BC}) e Hargreaves & Samani (ET_{0-Harg}) (Grupo A)

CRUPO A (Lavouras Mecanizadas)																		
Mês	Patrocínio-MG						Araguari-MG						Barreiras-BA					
	ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}		ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}		ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Jan.	4,78	3,47	3,44	2,33	4,96	4,43	4,41	3,46	3,10	2,33	5,05	4,43	4,79	4,20	3,54	2,89	5,55	5,03
Fev.	5,07	3,91	3,60	2,57	4,81	4,54	4,43	3,92	3,07	2,59	4,91	4,62	4,61	4,08	3,22	2,72	5,39	5,00
Mar.	4,82	3,66	3,53	2,64	4,52	4,08	4,16	3,61	2,99	2,57	4,58	4,27	4,59	4,23	3,30	2,92	5,25	5,03
Abr.	4,04	3,08	3,31	2,26	3,75	3,34	3,60	3,07	2,86	2,23	3,78	3,37	4,13	3,62	3,21	2,81	4,70	4,27
Mai	3,36	2,58	3,19	2,39	3,01	2,66	2,99	2,59	2,74	2,38	3,06	2,71	3,73	3,44	3,42	2,96	4,25	4,09
Jun.	2,90	2,44	2,98	2,29	2,66	2,58	2,72	2,42	2,73	2,31	2,71	2,59	3,61	3,38	3,73	3,20	4,08	3,94
Jul.	3,50	2,55	3,45	2,37	2,85	2,44	3,03	2,55	2,99	2,35	2,90	2,48	4,01	3,64	4,26	3,78	4,43	4,05
Ago.	4,87	3,33	4,58	2,84	3,81	3,30	4,08	3,26	3,80	2,75	3,83	3,32	4,96	4,39	5,14	4,60	5,49	4,85
Set.	4,96	3,77	4,17	3,03	4,61	4,16	4,37	3,69	3,50	2,92	4,58	4,08	5,62	4,82	5,30	4,03	6,30	5,99
Out.	5,18	3,69	3,89	2,61	4,92	4,32	4,43	3,69	3,26	2,62	4,96	4,37	5,11	4,43	4,21	3,40	6,11	5,67
Nov.	5,00	3,29	3,73	2,24	4,99	4,48	4,15	3,24	2,95	2,19	4,96	4,46	4,78	3,93	3,68	2,82	5,64	5,06
Dez.	4,59	3,49	3,32	2,40	4,89	4,58	3,94	3,46	2,76	2,38	4,92	4,54	4,61	3,81	3,47	2,71	5,48	5,00

Quadro 7 – Valores máximos e mínimos de ETo (mm.d⁻¹), Penman-Monteith (ET_{0-PM}), Blaney-Cridley (ET_{0-BC}) e Hargreaves & Samani (ET_{0-Harg}) (Grupo B)

CRUPO B (Lavouras Não-Mecanizadas)																		
Mês	Viçosa-MG						Caratinga-MG						Lavras-MG					
	ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}		ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}		ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Jan.	4,58	4,24	3,27	2,96	5,50	5,25	4,51	4,05	3,23	2,79	5,24	4,85	4,17	4,13	2,80	2,75	5,02	4,96
Fev.	4,44	3,89	3,11	2,63	5,25	4,82	4,69	4,14	3,39	2,94	5,17	4,86	4,28	4,15	2,91	2,84	4,93	4,74
Mar.	3,97	3,53	2,83	2,45	4,76	4,23	4,09	3,33	2,98	2,36	4,68	4,24	3,75	3,44	2,65	2,54	4,11	3,77
Abr.	3,06	2,41	2,31	1,89	3,74	3,25	3,14	2,67	2,40	2,10	3,77	3,30	3,08	2,73	2,34	2,24	3,34	2,99
Mai	2,25	1,84	1,91	1,62	3,00	2,66	2,40	1,99	2,10	1,76	3,08	2,79	2,26	2,00	2,00	1,93	2,75	2,50
Jun.	1,78	1,68	1,62	1,44	2,64	2,44	2,02	1,87	2,00	1,78	2,75	2,54	1,87	1,77	1,84	1,80	2,40	2,37
Jul.	1,97	1,64	1,73	1,39	2,75	2,42	2,16	1,84	2,03	1,52	2,89	2,49	2,10	1,89	2,03	1,96	2,56	2,41
Ago.	2,86	2,26	2,39	1,79	3,68	3,12	3,03	2,46	2,65	2,01	3,67	3,06	2,95	2,52	2,62	2,49	3,40	3,04
Set.	3,28	2,70	2,43	1,99	4,37	3,61	3,52	2,83	2,70	2,20	4,32	3,40	3,54	3,26	2,70	2,60	4,00	3,64
Out.	3,56	2,97	2,43	1,99	4,66	4,12	3,76	3,28	2,68	2,23	4,69	4,14	3,99	3,79	2,82	2,72	4,77	4,49
Nov.	3,87	3,38	2,66	2,26	4,90	4,49	4,00	3,13	2,83	2,12	4,84	5,37	4,10	4,03	2,83	2,77	4,96	4,84
Dez.	4,08	3,19	2,86	2,13	5,09	4,59	4,12	3,62	2,93	2,50	5,06	4,63	3,92	3,90	2,66	2,62	4,96	4,93

Quadro 8 – Valores máximos e mínimos de ETo (mm.d⁻¹), Penman-Monteith (ET_{0-PM}), Blaney-Cridley (ET_{0-BC}) e Hargreaves & Samani (ET_{0-Harg}) (Grupo B)

CRUPO B (Lavouras Não-Mecanizadas)												
Mês	Varginha-MG						Vitória da Conquista-BA					
	ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}		ET _{0-PM}		ET _{0-BC}		ET _{0-Harg}	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Jan.	4,29	3,86	2,93	2,58	5,17	4,91	4,78	4,19	3,49	2,92	5,02	4,74
Fev.	4,22	3,70	2,85	2,44	4,96	4,60	4,72	3,78	3,37	2,45	4,90	4,51
Mar.	3,92	3,52	2,76	2,44	4,50	4,03	4,82	4,30	3,57	3,00	4,71	4,47
Abr.	3,18	2,77	2,48	2,22	3,61	3,20	4,05	3,46	3,12	2,61	3,92	3,41
Mai	2,37	1,99	2,14	1,87	2,85	2,52	3,63	3,14	3,06	2,52	3,27	3,01
Jun.	1,94	1,86	1,93	1,72	2,49	2,35	3,34	3,13	2,92	2,56	2,88	2,70
Jul.	2,15	1,90	2,07	1,80	2,67	2,40	3,50	2,99	3,02	2,51	3,05	2,64
Ago.	3,07	2,50	2,74	2,26	3,61	3,07	4,62	3,83	3,90	3,13	3,87	3,34
Set.	3,72	3,26	2,92	2,27	4,38	3,74	5,25	4,48	4,12	3,25	4,64	4,53
Out.	3,96	3,24	2,79	2,24	4,83	4,38	5,01	4,09	3,73	2,83	5,03	4,65
Nov.	4,23	3,73	2,93	2,48	5,06	4,60	4,52	4,00	3,27	2,78	4,92	4,62
Dez.	4,14	3,69	2,84	2,48	5,07	4,62	4,53	3,99	3,32	2,82	4,91	4,53

Quadro 9 – Precipitação mínima mensal (mm.d⁻¹) de cada local estudado, com 50% de probabilidade de ocorrência

Lavouras Mecanizadas (GRUPO A)													
Localidade	Mês do Ano												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
	Precipitação (mm/dia)												
Araguari	7,04	4,68	3,80	1,53	0,46	-	-	0,11	1,55	4,61	6,38	8,59	3,23
Barreiras	3,56	3,10	2,19	1,33	-	-	-	-	0,39	1,85	4,56	3,64	1,72
Patrocínio	7,40	5,41	3,85	1,54	0,42	-	-	-	1,43	4,48	6,27	8,65	3,29

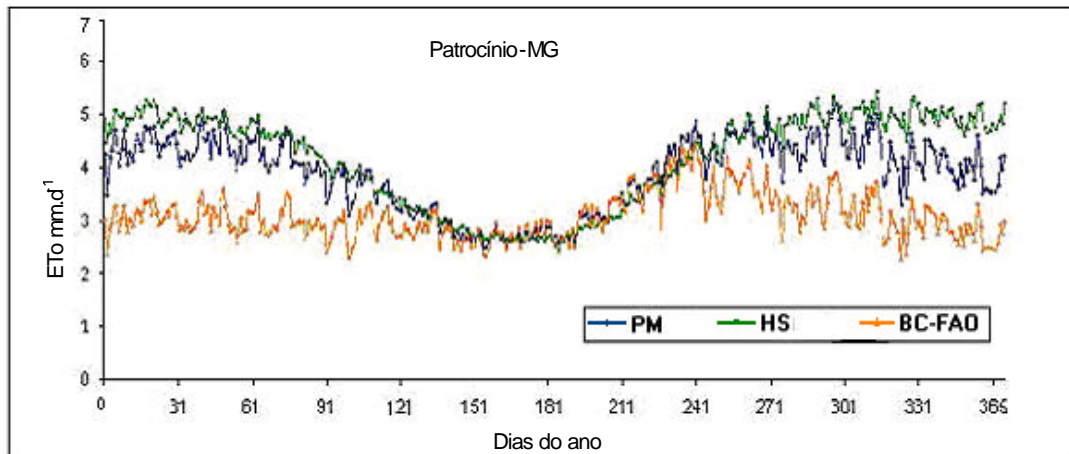
Lavouras Não-Mecanizadas (GRUPO B)													
Localidade	Mês do ano												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
	Precipitação (mm/dia)												
Caratinga	3,81	2,12	2,11	1,27	-	-	-	-	0,15	2,86	4,83	5,94	1,92
Lavras	6,64	5,01	2,82	1,22	-	-	-	0,22	1,06	3,47	5,64	7,12	2,77
Varginha	8,80	6,90	4,60	2,15	1,10	1,00	0,70	1,10	2,20	4,62	7,30	8,75	4,06
Viçosa	5,10	3,15	2,60	1,25	-	-	-	0,20	1,00	3,80	6,00	5,70	2,40
Vitória da Conquista	2,70	2,00	1,40	1,10	-	-	-	-	-	1,70	4,15	3,25	1,36

Nas Figuras 2a a 9a, tem-se a variação, ao longo do período analisado, das estimativas da ETo calculadas pelos métodos Blaney-Criddle-FAO e Hargreaves & Samani, comparadas com as pelo método-padrão Penman-Monteith para as regiões em estudo. Observou-se, de forma geral, que os métodos simplificados de estimativa da evapotranspiração apresentam variações expressivas quando comparadas com as pelo método-padrão, sendo menores no método Hargreaves & Samani do que no método de Blaney-Criddle-FAO.

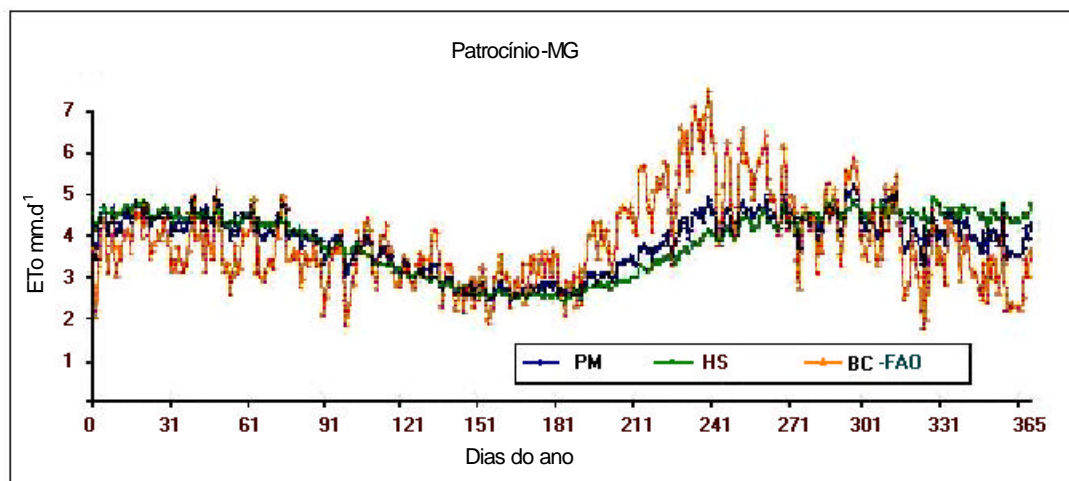
Verificou-se que o método de Hargreaves & Samani superestima a média diária da ETo, em todos os meses do ano, nas cidades de Caratinga, Varginha, Lavras e Viçosa, quando comparado com o de Penman-Monteith. Em outras cidades, como Patrocínio e Araguari, os valores tenderam à concordância nos meses com baixas temperaturas e precipitações (maio a agosto), não subestimando em muito nos demais meses do ano. Notou-se que na cidade de Vitória da Conquista houve um pouco de subestimação dos valores nos meses de agosto a outubro, com maior concordância no período de agosto a maio. Verificou-se também que o método de Blaney-Criddle-FAO subestimou os valores das médias diárias, principalmente nos períodos correspondentes às épocas de maiores temperaturas e precipitações, bem como uma tendência de concordância de valores nos meses de maio a agosto, em todos os locais (Figuras 2a a 9a).

Nas Figuras 2b a 9b, têm-se os valores médios diários, depois do ajuste proposto, com nítida tendência de melhor ajuste do método de Hargreaves & Samani.

Essas comparações são justificadas pela falta e, ou, dificuldade na obtenção dos dados climáticos necessários para os cálculos de estimativa da ETo pelo método-padrão de Penman-Monteith-FAO. Na prática, procuram-se utilizar métodos com menor exigência de dados de entrada, sendo de extrema importância a geração de informações, aos técnicos de campo e pesquisadores, a respeito da aplicação e confiabilidade dos métodos simplificados. Tais estudos são fundamentais para determinação dos parâmetros de ajuste das equações dos métodos simplificados.

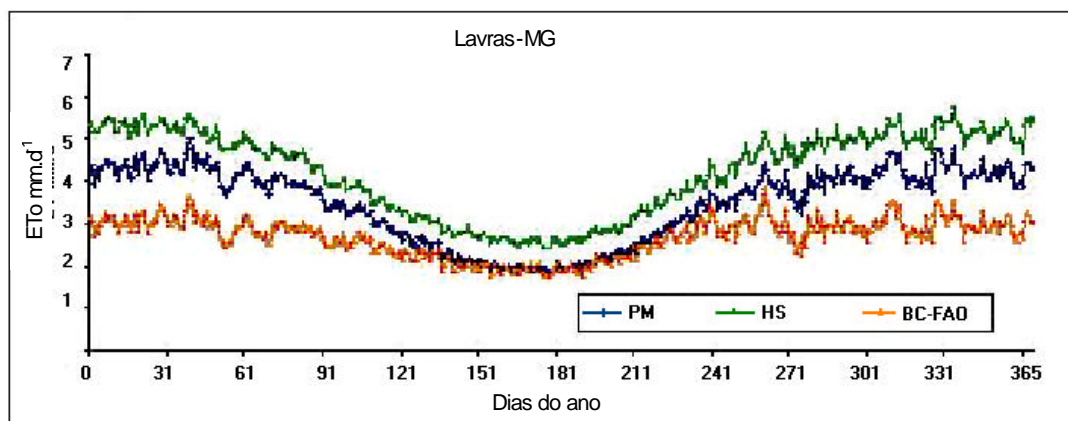


a

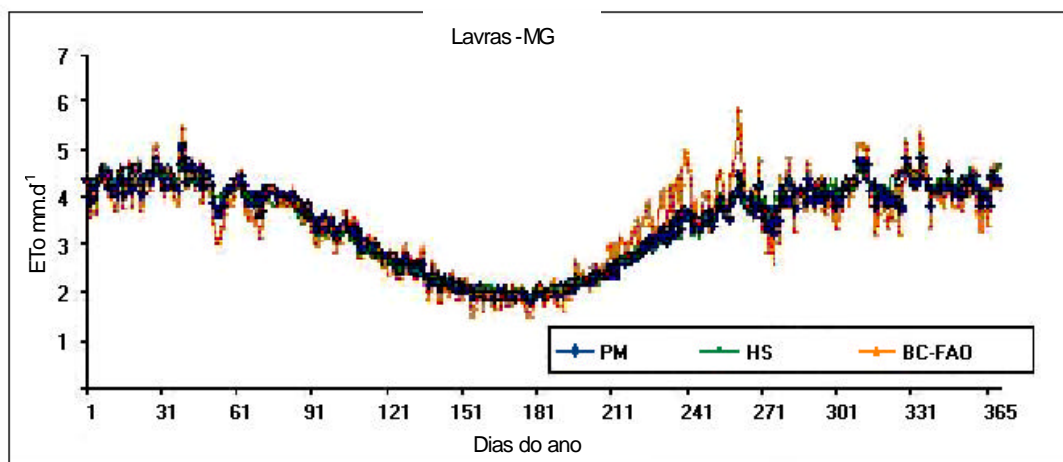


b

Figura 2 – Comparação dos valores diários de ETo (mm.d^{-1}) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Patrocínio, MG.

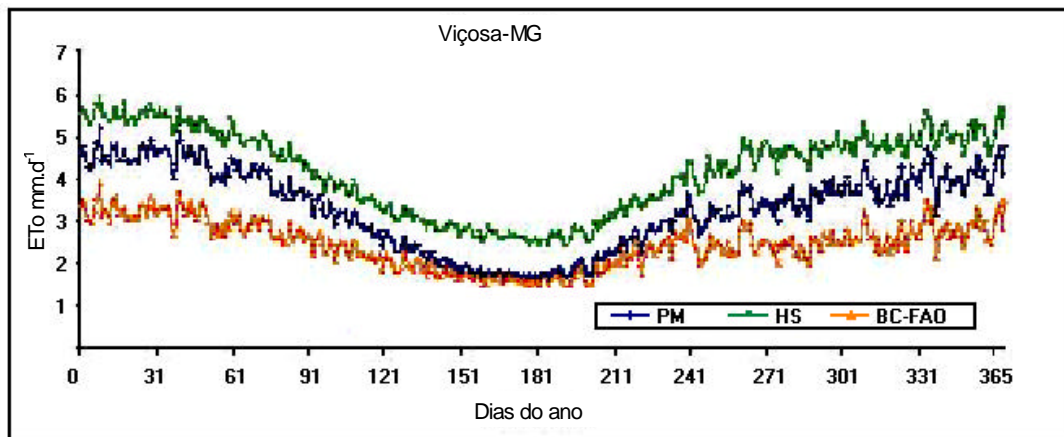


a

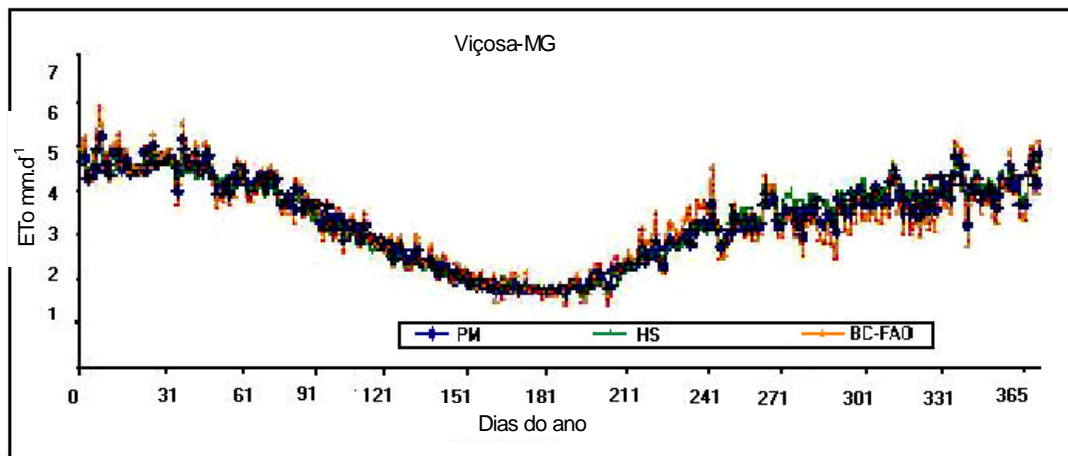


b

Figura 3 – Comparação dos valores diários de E_{To} ($mm.d^{-1}$) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Lavras, MG.

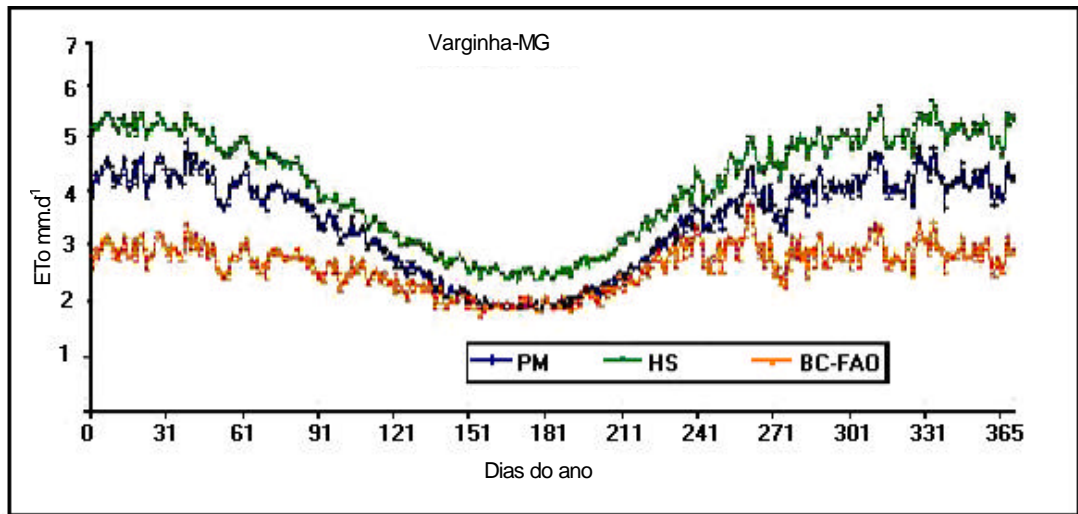


a

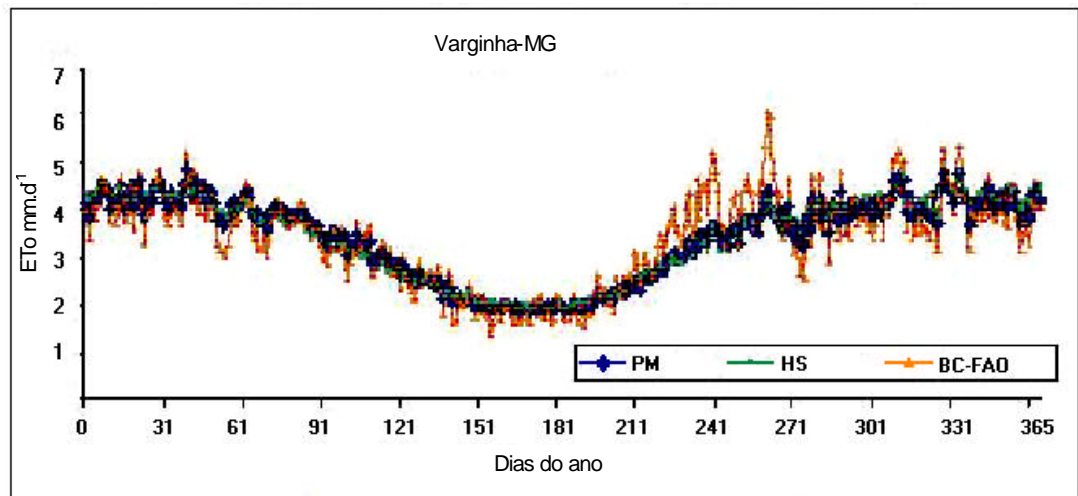


b

Figura 4 – Comparação dos valores diários de ET_0 ($mm.d^{-1}$) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Cridde (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Viçosa, MG.

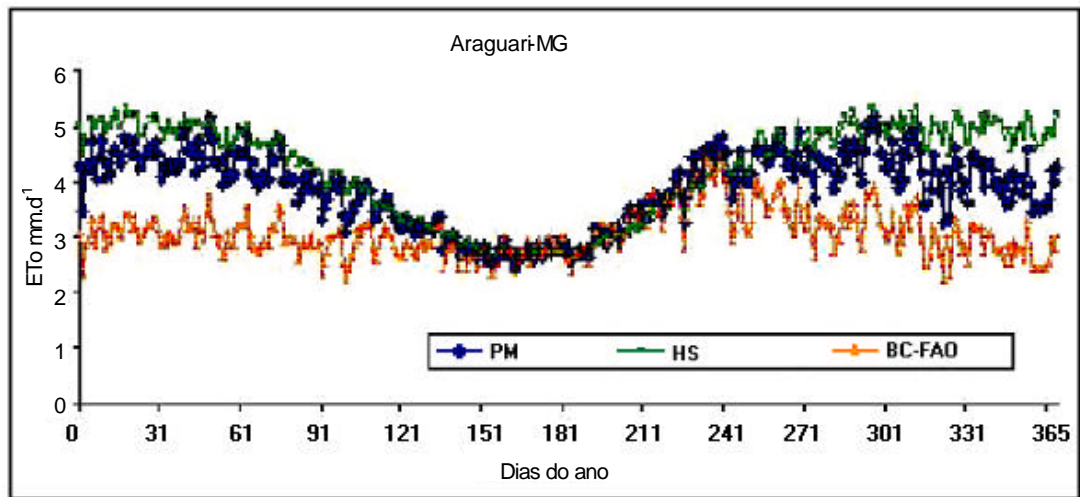


a

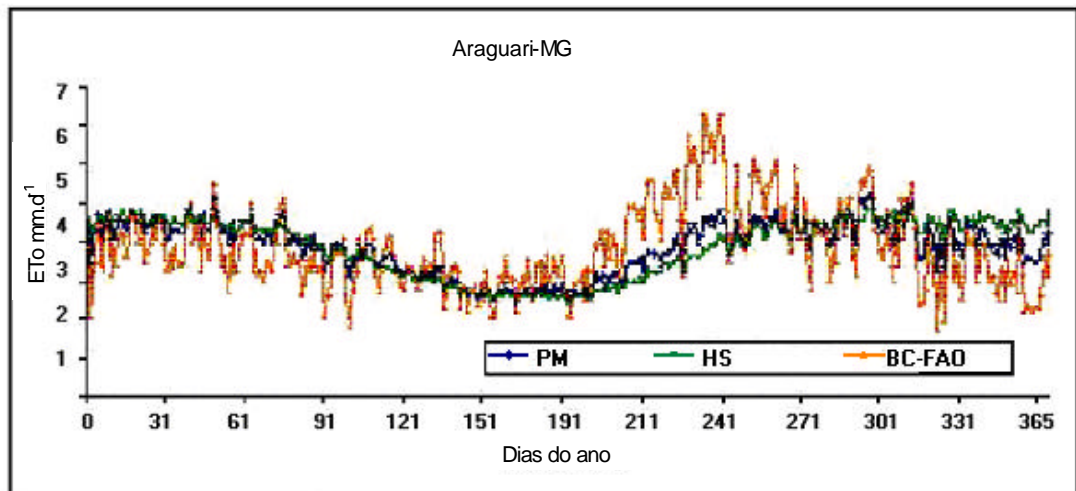


b

Figura 5 – Comparação dos valores diários de ETo (mm.d^{-1}) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Cridde (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Varginha, MG.

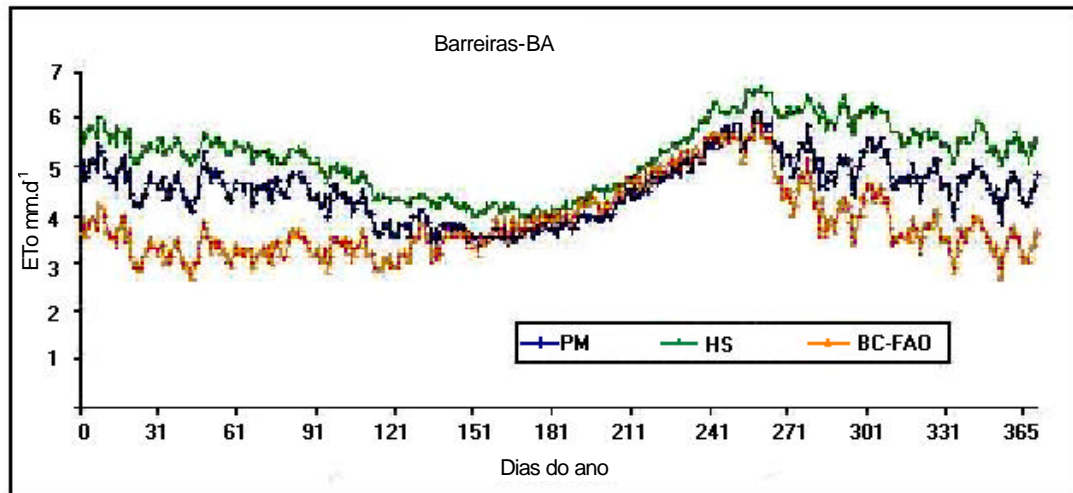


a

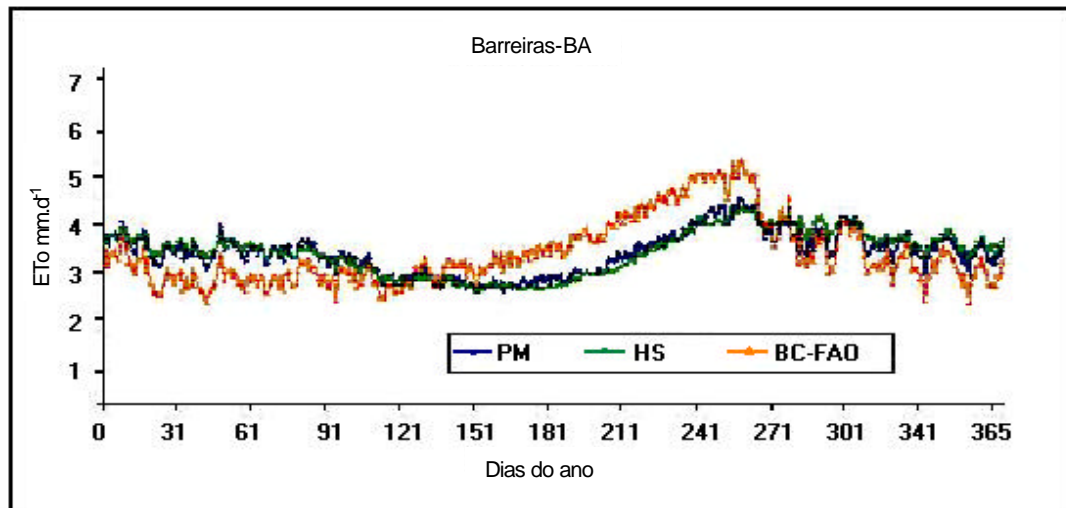


b

Figura 6 – Comparação dos valores diários de ET_0 (mm.d^{-1}) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Cridde (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Araguari, MG.

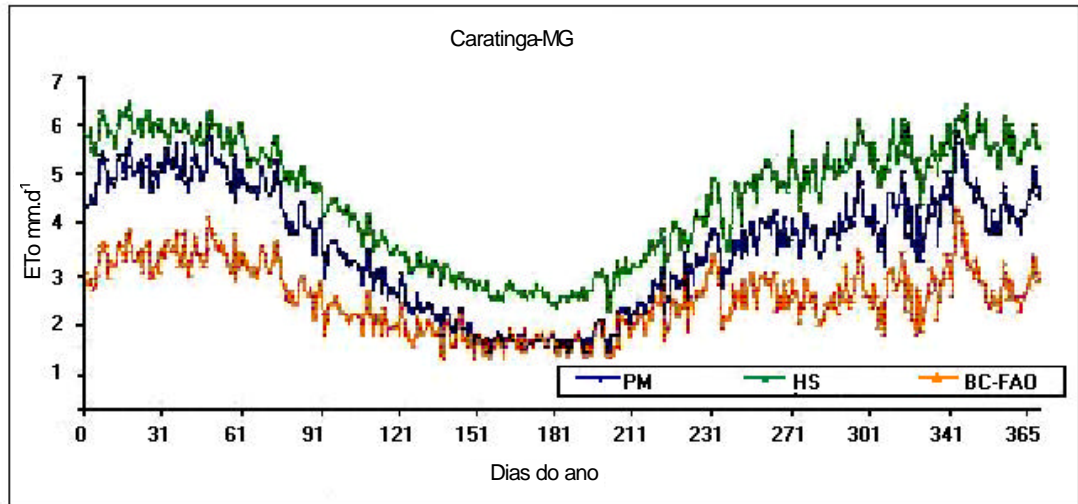


a

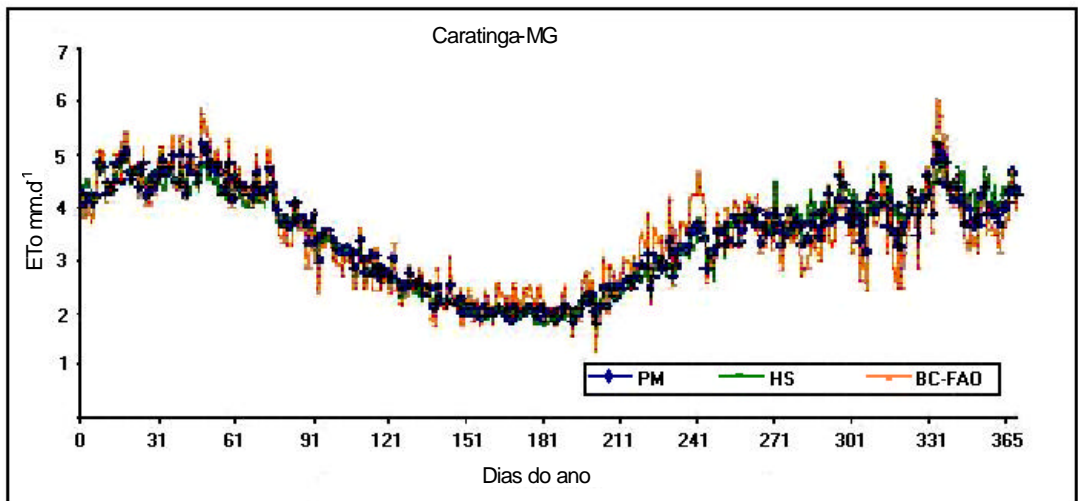


b

Figura 7 – Comparação dos valores diários de ET_0 ($mm.d^{-1}$) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Barreiras, BA.

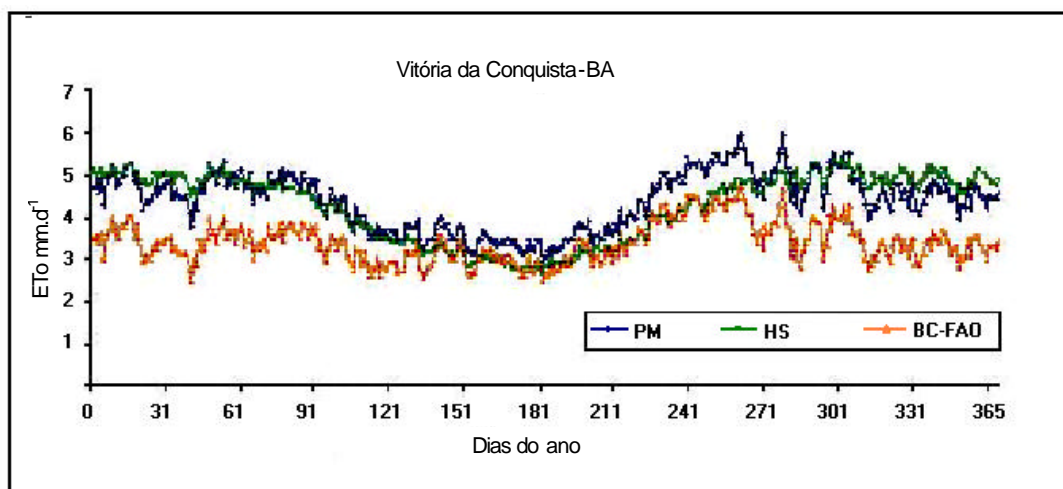


a

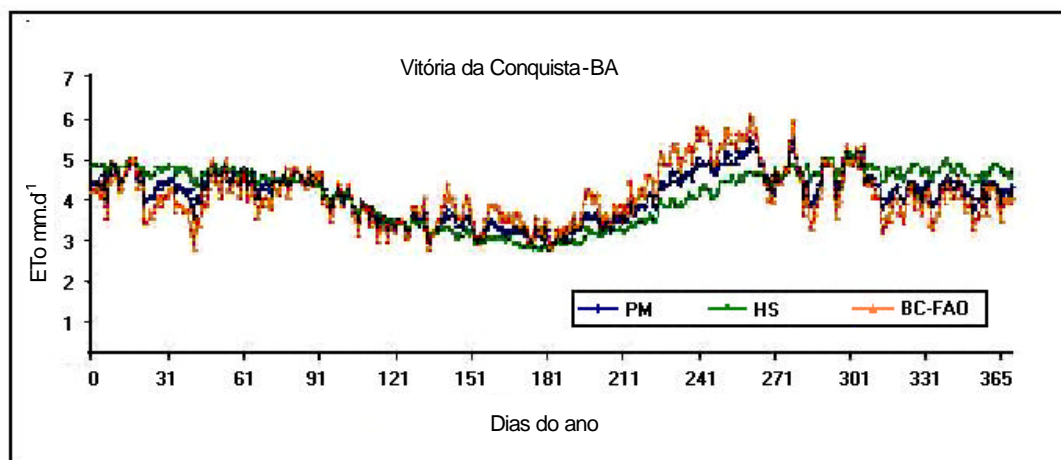


b

Figura 8 – Comparação dos valores diários de E_{To} ($mm.d^{-1}$) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Cridde (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Caratinga, MG.



a



b

Figura 9 – Comparação dos valores diários de ETo (mm.d^{-1}) estimados pelos três métodos analisados, Penman-Montheit (PM), Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle (BC-FAO), no decorrer do período de um ano, antes e depois do ajuste, para a cidade de Vitória da Conquista, BA.

As Figuras 2 a 9 permitem apenas a visualização e a análise qualitativa entre os métodos, o que limita, de certa forma, as conclusões. Para uma análise quantitativa, fizeram-se os estudos comparativos, apresentados nas Figuras 10 a 17, com base em uma análise de regressão de cada um dos métodos de estimação da ETo, em relação aos valores determinados pelo método de Penman-Monteith. Observou-se com clareza que, em geral, existe superioridade do método de Hargreaves & Samani em relação ao de Blaney-Criddle-FAO. O primeiro método apresenta maior tendência a superestimar a ETo, enquanto o segundo subestima os valores de ETo, em comparação com os valores estimados pelo método-padrão, Penman-Monteith.

A existência de boa relação entre os valores estimados pelo método-padrão e pelo método de Hargreaves & Samani pode ser comprovado pela regressão linear, em que os coeficientes confirmam a boa correlação entre as duas variáveis.

Nos Quadros 10 e 11 estão apresentados os resumos das análises estatísticas dos métodos avaliados entre os valores de ETo diários para os Grupos A e B. O estudo comparativo dos métodos de estimativa da ETo foi realizado, considerando-se valores de todos os dias do ano. Apresenta-se também, nesses quadros, uma classificação para os dois métodos simplificados.

Expressando em porcentagem os valores médios das estimativas da ETo para o ano todo, com relação ao método considerado como padrão (PM) (Quadros 10 e 11), notou-se uma tendência de superestimativa do método de Hargreaves & Samani para a maioria dos locais, superestimando em até 27% o valor médio anual para a cidade de Viçosa, MG, com exceção de Vitória da Conquista, onde esse método subestimou em 3% o valor estimado pelo método-padrão (PM). Já o método de Blaney-Criddle-FAO subestimou, em todos os locais estudados, o valor médio anual, com o valor máximo de 25% em Viçosa. O método que, em média, mais se aproximou do padrão foi o de Hargreaves & Samani, com tendência de superestimar os valores da ETo. A tendência de superestimar a ETo pelo método de Hargreaves & Samani também foi observada por BONOMO et al. (1999), nas regiões do Triângulo e Noroeste de Minas Gerais, utilizando-se o mesmo tipo de comparação usada no presente trabalho.

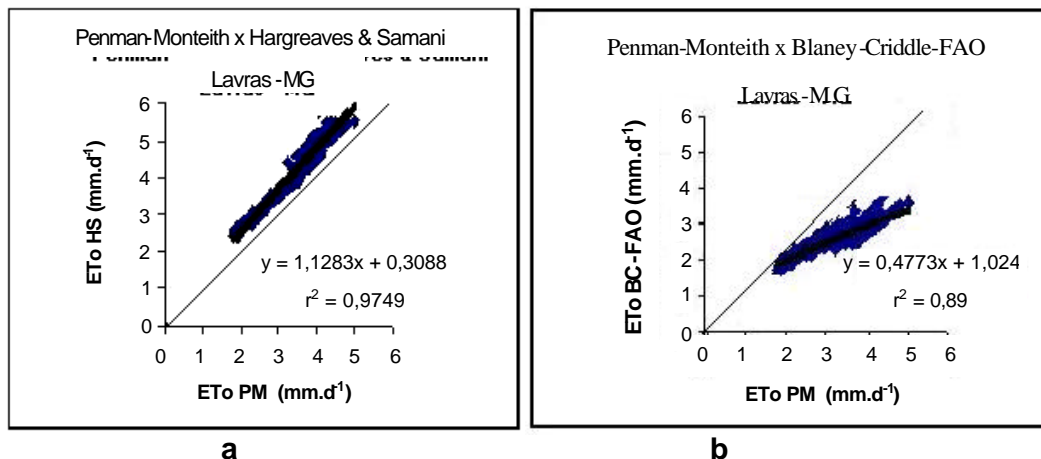


Figura 10 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Lavras, MG, Grupo B.

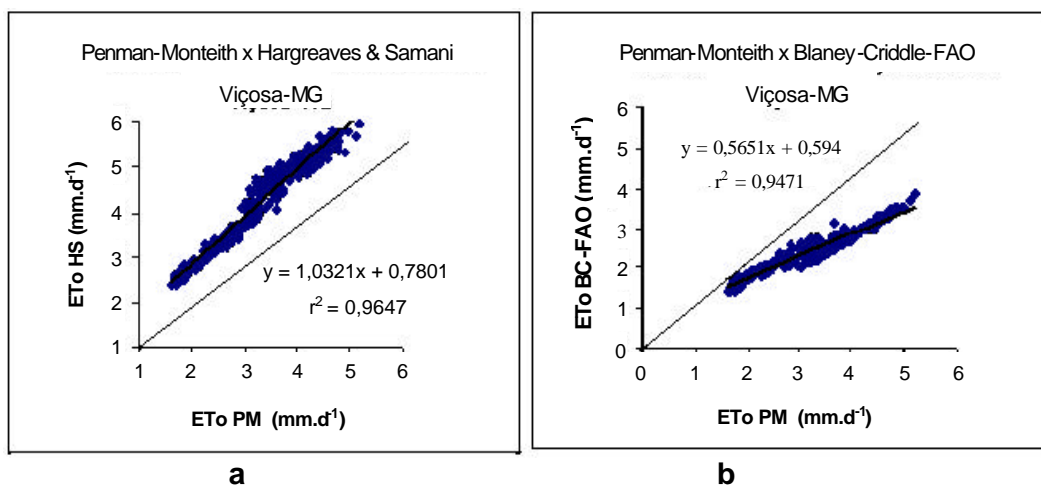


Figura 11 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Viçosa, MG, Grupo B.

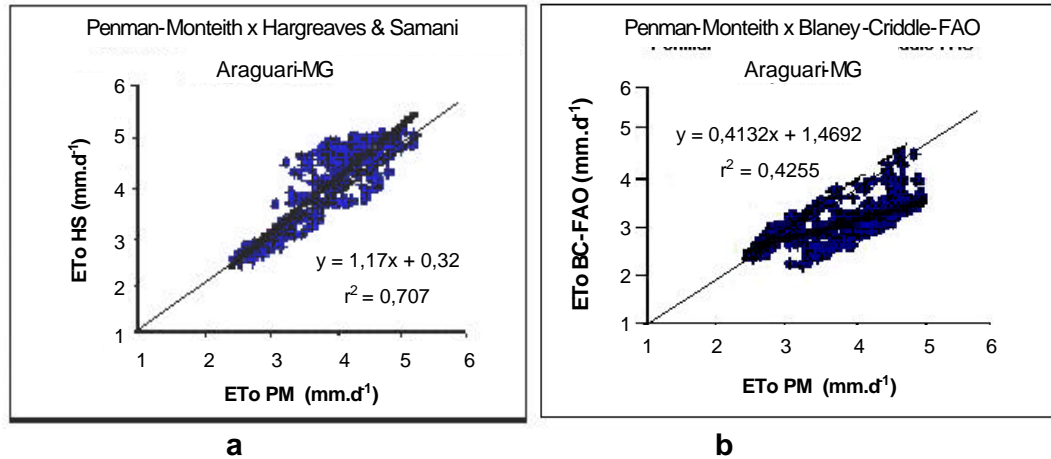


Figura 12 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Cridde-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Araguari, MG, Grupo A.

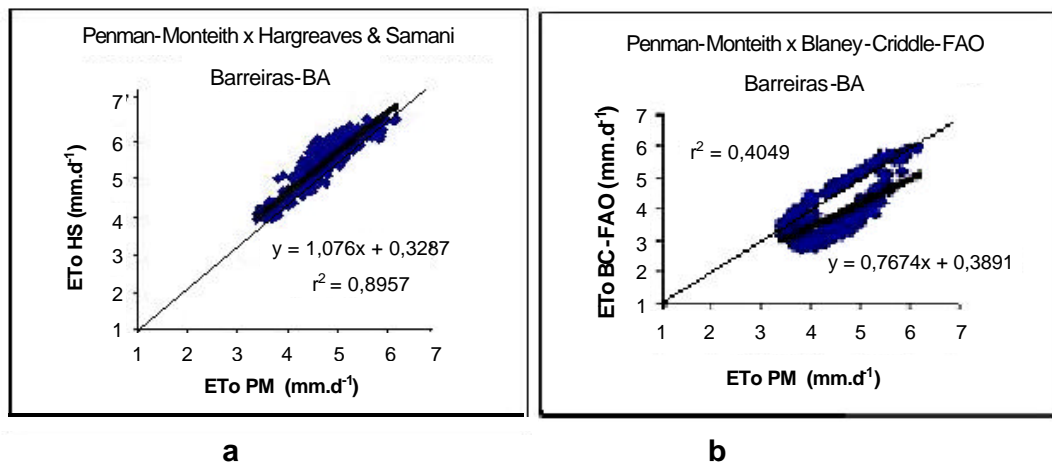


Figura 13 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Cridde-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Barreiras, BA, Grupo A.

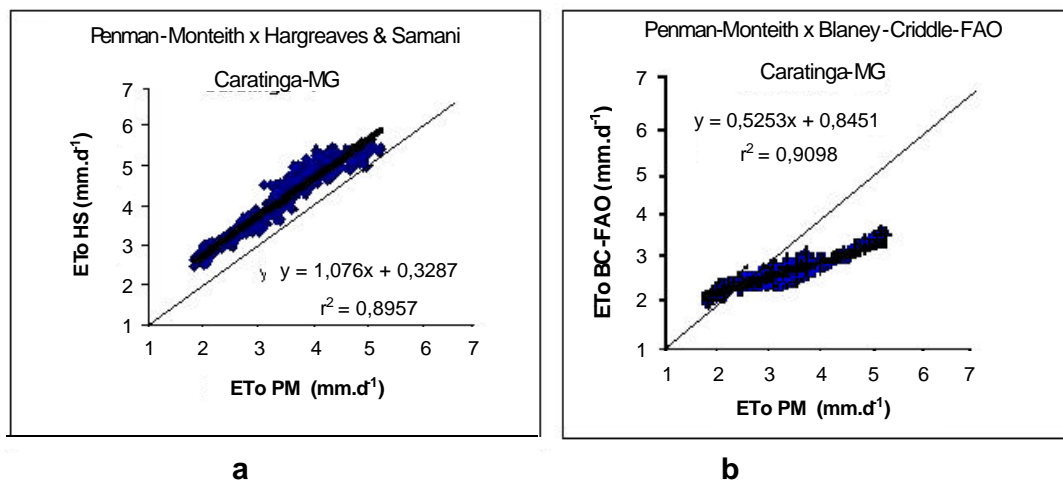


Figura 14 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Caratinga, MG, Grupo B.

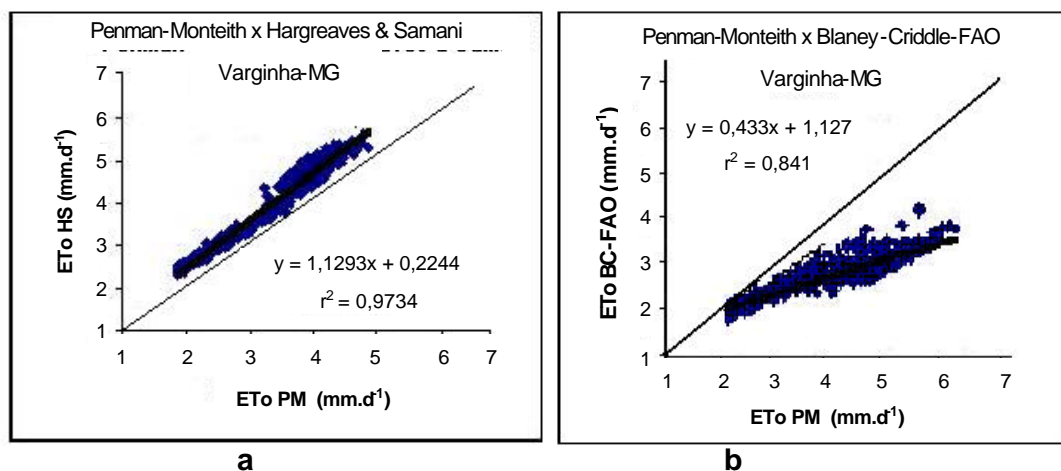


Figura 15 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Varginha, MG, Grupo B.

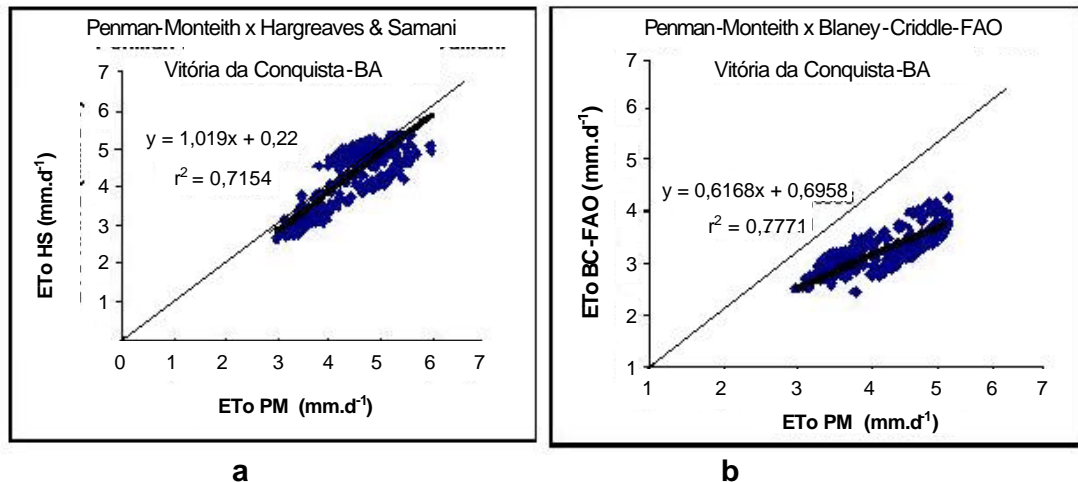


Figura 16 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Vitória da Conquista, BA, Grupo B.

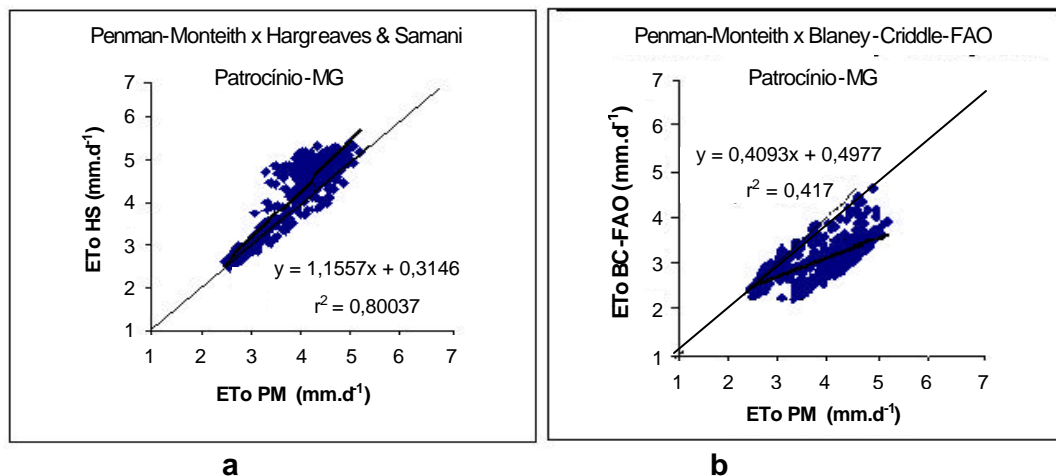


Figura 17 – Comparação entre os valores de ETo média diária estimados pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ETo calculada pelos métodos simplificados Hargreaves & Samani (HS) e Blaney-Criddle-FAO (BC-FAO), respectivamente, para a cidade de Patrocínio, MG, Grupo A.

Quadro 10– Resumo das análises estatísticas dos valores diários: (1) evapotranspiração média diária do período, mm d⁻¹; (2) percentagem em relação ao método-padrão (PM); (3) erro-padrão de estimativa em relação ao método-padrão, mm d⁻¹; (4) e (5) coeficientes da equação de regressão ajustada; (6) coeficiente de determinação para a regressão; e (7) erro-padrão de estimação em relação à regressão, mm d⁻¹, para as cidades que representam o grupo das lavouras mecanizadas (Grupo A)

Método	Classif.	ET _o (mm d ⁻¹) (1)	% (2)	SEE (mm d ⁻¹) (3)	a (4)	b (5)	r ² (6)	SEEd (mm d ⁻¹) (7)
Diário								
Araguari-MG								
Penman		3,86	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,18	109	0,53	-0,33	1,16	0,79	0,34
F-BC	2	3,06	80	0,94	1,47	0,41	0,42	0,78
Barreiras-BA								
Penman		4,55	100	-	-	-	-	-
Harg	1	5,22	115	0,72	0,32	1,07	0,89	0,21
F-BC	2	3,88	85	0,90	0,40	0,76	0,40	0,76
Patrocínio-MG								
Penman		3,86	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,14	108	0,50	-0,31	1,15	0,80	0,34
F-BC	2	3,08	80	0,94	1,49	0,40	0,41	0,81

Quadro 11 – Resumo das análises estatísticas dos valores diários: (1) evapotranspiração média diária do período, mm d⁻¹; (2) percentagem em relação ao método-padrão (PM); (3) erro-padrão de estimativa em relação ao método-padrão, mm d⁻¹; (4) e (5) coeficientes da equação de regressão ajustada; (6) coeficiente de determinação da regressão; e (7) erro-padrão de estimação em relação à regressão, mm d⁻¹, para as cidades do Grupo B, constituído de lavouras não mecanizadas

Método	Classif.	ET _o (mm d ⁻¹) (1)	% (2)	SEE (mm d ⁻¹) (3)	a (4)	b (5)	r ² (6)	SEEA (mm d ⁻¹) (7)
Diário								
Caratinga-MG								
Penman		3,45	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,17	121	0,76	0,83	0,96	0,94	0,22
F-BC	2	2,65	77	0,91	0,84	0,52	0,90	0,29
Varginha-MG								
Penman		3,43	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,10	120	0,70	0,22	1,12	0,97	0,14
F-BC	2	2,61	76	0,97	1,12	0,43	0,84	0,38
Viçosa-MG								
Penman		3,30	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,20	127	0,91	0,78	1,03	0,96	0,18
F-BC	2	2,50	75	0,95	0,59	0,56	0,94	0,22
Vitória da Conquista-BA								
Penman		4,40	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,26	97	0,45	-0,22	1,01	0,71	0,42
F-BC	2	3,41	78	1,05	0,69	0,61	0,77	0,36
Lavras-MG								
Penman		3,45	100	-	-	-	-	-
Harg	1	4,20	122	0,78	0,30	1,12	0,97	0,14
F-BC	2	2,70	78	0,92	1,02	0,47	0,89	0,31

Observou-se, pela comparação feita em razão do erro-padrão de estimativa (SEE), que o método de Hargreaves & Samani estima melhor do que o de Blaney-Criddle-FAO (Quadros 10 e 11). O SEE dá pesos iguais às variações absolutas entre os valores estimados pela variável independente e os pela variável dependente, indicando-se como cada método estimou os valores de ETo, em determinado período, para cada localidade em estudo (JENSEN et al., 1990).

Verificou-se que os valores de SEE apresentaram uma variação de 0,50 mm d⁻¹ a 0,94 mm.d⁻¹ (Quadro 10), com o menor valor sendo obtido pelo método de Hargreaves & Samani e o maior valor, pelo de Blaney-Criddle-FAO, respectivamente para as cidades de Patrocínio e Araguari (Grupo A). No Grupo B, os valores de SEE variaram de 0,45 mm.d⁻¹ a 1,05 mm.d⁻¹ para a cidade de Vitória da Conquista, BA, estimados pelos métodos de Hargreaves & Samani e Blaney-Criddle-FAO, respectivamente (Quadro 11). Observou-se uma tendência geral de elevados valores pelo método de Blaney-Criddle-FAO, resultantes da consistente subestimativa da ETo para todas as regiões, sendo mais acentuada para os períodos chuvoso e quente do ano.

Observa-se também, nos Quadros 10 e 11, que, entre os métodos avaliados nos diferentes locais de estudo, o de Hargreaves & Samani foi o que apresentou, em média, valores do coeficiente linear (a) da equação de regressão ajustada que mais se aproximaram de zero e do coeficiente angular (b) que mais chegaram perto da unidade, indicando estreita concordância entre os valores estimados por esse método e os estimados pelo método-padrão de estimativa Penman-Monteith.

O erro-padrão de estimativa ajustado (SEEA), como descrito anteriormente, representa uma variação média dos valores de evapotranspiração de referência estimados pelos diferentes métodos e corrigidos pelos coeficientes da regressão linear completa, em relação aos valores obtidos pelo método-padrão Penman-Monteith.

Observa-se, no Quadro 10 (Grupo A), que os valores do SEEA apresentaram variação de 0,21 mm.d⁻¹ em Barreiras, com o uso do método de Hargreaves & Samani, até 0,81 mm.d⁻¹ pelo método de Blaney-Criddle-FAO, para Patrocínio. No Quadro 11 (Grupo B), verifica-se que os valores de SEEA variaram de 0,14 mm d⁻¹ (Varginha e Lavras) a 0,38 mm.dia⁻¹ (Varginha),

calculados pelos métodos Hargreaves & Samani e Blaney-Criddle-FAO, respectivamente.

Comparando os valores do erro-padrão de estimativa (SEE) com os do erro-padrão de estimativa ajustado (SEEA) (Quadros 10 e 11), notou-se que na maioria dos casos ocorre decréscimo nos desvios com o ajuste feito pela regressão, indicando que pode haver melhoria de estimativa de ETo pelos métodos por meio de ajuste local, à exceção do método de Hargreaves & Samani, para a cidade de Vitória da Conquista, onde os valores de SEE e SEEA permaneceram num mesmo nível e não necessitaram de calibração.

Os métodos de Hargreaves & Samani e Blaney-Criddle-FAO requereram maiores correções, ambos para a cidade de Viçosa, de $0,91 \text{ mm.d}^{-1}$ a $0,18 \text{ mm.d}^{-1}$ e de $0,95 \text{ mm.d}^{-1}$ a $0,22 \text{ mm.d}^{-1}$, pelos respectivos métodos.

O método de Hargreaves & Samani apresentou menores valores de SEE e maiores coeficientes de determinação (r^2) (Quadros 10 e 11). Também, mostrou-se melhor do que o método de Blaney-Criddle-FAO, pois, apesar de superestimar os valores de ETo em relação ao método-padrão, nos meses de alta precipitação tende à concordância com os valores na época sem chuva do ano, época coincidente com o período de irrigação da cultura do café.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada por três metodologias, que diferem entre si no nível de complexidade e na quantidade de dados demandados. As análises foram feitas para as condições das principais regiões produtoras de café do Triângulo Mineiro, Sul, Leste e Zona da Mata de Minas Gerais e Oeste e Sudeste da Bahia. Os locais selecionados foram divididos em dois grupos, de acordo com o sistema de cultivo: lavouras mecanizadas (Grupo A) e lavouras com cultivo manual (Grupo B).

Para a definição do método que melhor se ajustava às condições das localidades estudadas, foram comparados os valores de ET_o, em base diária, determinados pelo método de Penman-Monteith, considerado como padrão, com os estimados, para o ano todo, pelos seguintes métodos: Hargreaves & Samani e Blaney-Criddle-FAO, por meio de simulações feitas com o módulo SIMULA, do Programa IRRIGA, utilizando-se a série histórica de dados meteorológicos para cada região, contida no banco de dados desse programa. Determinaram-se os valores médios diários estimados de ET_o, pelos três métodos avaliados nas diferentes regiões, no período de um ano.

Para comparação e análise dos resultados, foram utilizados os critérios envolvendo erro percentual, o erro-padrão de estimativa (SEE), o coeficiente de ajuste das equações lineares completas, o grau de dispersão com a equação

da reta gerada pela regressão e respectivos coeficientes de determinação (r^2) e o erro-padrão de estimativa ajustado pela regressão (SEEA).

Com base nos resultados das análises realizadas para execução do presente trabalho, pode-se concluir o seguinte:

1) A comparação entre os valores diários estimados pelos métodos simplificados e os valores calculados pelo método-padrão (PM) indica que, em geral, o método que apresentou precisão mais adequada para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) foi o de Hargreaves & Samani, que gerou bons resultados de pesquisa, havendo tendência a superestimá-los nos períodos chuvosos. Porém, para o período que coincide com o de maior demanda de irrigação do cafeeiro (maio a agosto), ele apresentou excelente concordância com os valores estimados pelo método-padrão, podendo ser recomendado, com os devidos ajustes, para fins de manejo e planejamento da irrigação nas regiões estudadas.

2) O método de Blaney-Criddle FAO subestima os valores de ET_o nas diferentes condições climáticas, principalmente nos períodos de alta demanda evapotranspirométrica, com uma tendência de concordância dos valores nos meses de maio e agosto, em todas as regiões do estudo.

3) O método de Hargreaves & Samani foi o que apresentou, em média, os menores valores de erro-padrão de estimativa (SEE), melhor dispersão dos pontos com a equação da reta gerada pela regressão (r^2) e menor erro-padrão de estimativa ajustado pela regressão (SEEA).

4) Comparando os valores do erro-padrão de estimativa (SEE) com os do erro-padrão de estimativa ajustado (SEEA), conclui-se que, na maioria dos casos, ocorreu decréscimo nos desvios com o ajuste feito pela regressão pelos métodos avaliados, indicando que pode haver melhoria de estimativa de ET_o por esses métodos, por meio de ajuste local, à exceção do método de Hargreaves & Samani para a cidade de Vitória da Conquista, onde os valores de SEE e SEEA não apresentaram variação significativa.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EQUAÇÃO DE OBTENÇÃO DA LÂMINA BRUTA DE ÁGUA PARA PROJETO DE IRRIGAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O intenso desenvolvimento e a competitividade no setor agrícola impõem inovações estratégicas para a potencialização da produtividade e a diminuição dos custos de produção. No caso especial da atual cafeicultura brasileira, a ampliação do mercado consumidor é fundamental para o fortalecimento da atividade. No entanto, para a satisfação dos consumidores, é necessário melhoria na qualidade dos produtos, associada à preservação do meio ambiente, permitindo a sustentabilidade do sistema de produção. Isso leva vários produtores a lançar mão de novas tecnologias. Dentre outras, a irrigação tem-se mostrado uma boa alternativa para o alcance de tais melhorias.

Nesse contexto, é importante o desenvolvimento de pesquisas que visem avaliar e adequar cada um dos fatores de produção, incluindo a eficiência e o manejo da água de irrigação, bem como definindo parâmetros básicos de manejo que expressam a necessidade hídrica da cultura, ou seja, quanto e quando irrigar.

A prática da irrigação ainda não é usada em grande escala no Brasil, mas a pesquisa tem demonstrado que ela constitui uma maneira de utilizar a água como insumo, gerando efeitos econômicos positivos, pela possibilidade de elevar os rendimentos, concentrar a colheita e obter grãos de melhor qualidade, além de contribuir para a organização do trabalho agrícola (ZAMORA e SANCHEZ, 1992).

Até bem pouco tempo atrás, regiões com estiagem prolongada foram marginalizadas para a prática da cafeicultura, porém com o progresso técnico-científico e a utilização de práticas agrícolas modernas, por exemplo a irrigação, essas regiões já estão sendo incorporadas para o plantio de café (CAMARGO e PEREIRA, 1990).

O cafeeiro é afetado, nas diversas fases fenológicas, pelas condições meteorológicas, principalmente por falta ou excesso de água e temperatura, que irão influenciar diretamente o sistema solo-planta-ambiente, refletindo negativamente na produtividade da cultura.

Os métodos mais utilizados para irrigação da cultura do café são aspersão, microaspersão, tripa, autopropelido e gotejamento. Convém salientar que vários fatores determinam a escolha de um sistema de irrigação, dentre os quais clima, solo, topografia, disponibilidade e qualidade da água, culturas e consumo de energia. Igualmente importante é o manejo do uso da água na irrigação. Todos esses fatores deverão ser devidamente considerados em uma decisão econômica e ambiental, para definir o sistema de irrigação mais adaptado às características de cada local (SCALOPI, 1985).

No Brasil, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza qualquer estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação. Apesar da disponibilidade de vários métodos de manejo, os irrigantes não têm sido muito receptivos a qualquer método em particular. Segundo JENSEN (1983), os principais fatores que colaboram para que isso ocorra são o fato de o custo da água de irrigação ser muito baixo, comparado com o de implantação de um programa de manejo; e a diminuição da produtividade por atraso na irrigação, fertilização imprópria e irrigação excessiva, que não pode ser facilmente conhecida e quantificada.

O cálculo da evapotranspiração da cultura ou do uso consuntivo da água pelas culturas pode ser feito por meio de medições, usualmente utilizando-se

tanques de evaporação instalados na própria área de cultivo, ou por equações empíricas. O uso dessas equações viabiliza a utilização de modelos computacionais, como o IRRIGA.

O IRRIGA é um programa voltado tanto para o manejo da irrigação em tempo real (MANEJO e DECISÃO) quanto para simulação de necessidades hídricas das culturas e da lâmina de irrigação (SIMULA). O software foi desenvolvido com o intuito de utilizar dados meteorológicos para a estimativa da evapotranspiração de referência (COSTA, 1998; MANTOVANI, 1998). A partir dos dados de Eto, podem-se promover correções das condições reais de evapotranspiração máxima da cultura, o que é feito com o emprego de coeficientes de ajuste, como: o coeficiente de cultura (K_c), o coeficiente para condição de irrigação localizada (K_l) e o coeficiente de estresse hídrico, que varia de acordo com a disponibilidade de água no solo, estimando-se o consumo de água pela cultura em cada estágio de desenvolvimento. Porém, alguns dos componentes envolvidos no balanço hídrico do solo podem transferir erros ao valor da lâmina bruta de irrigação, devido a erros de medição e de estimativas desses componentes.

Em virtude desse fato, erros de determinação da lâmina bruta, por meio da equação dessa lâmina para projeto de irrigação, podem vir a comprometer todo o planejamento de uma área irrigada, uma vez que a dotação de água é o elemento principal e mais importante para estruturar esse trabalho e dependente das necessidades hídricas das culturas.

A interferência que os erros inerentes aos componentes de determinada equação causam na determinação da lâmina bruta de irrigação (L_B) pode ser analisada por meio de uma análise de sensibilidade relativa do valor da L_B a cada um desses componentes.

Uma análise de sensibilidade permite determinar o coeficiente de sensibilidade relativa da variável dependente a qualquer variável independente do modelo.

Com referência à equação de obtenção da lâmina bruta para irrigação, é importante que se proceda a uma análise de sensibilidade, permitindo-se determinar a importância dos componentes presentes no modelo em função de suas interferências no valor da lâmina bruta. Dessa forma, os erros ocorridos nos componentes que apresentam alta sensibilidade relativa serão

extremamente mais problemáticos para a obtenção da lâmina bruta e para um ajuste do modelo, em comparação com aqueles que mostram baixa sensibilidade.

Tal situação motivou a realização deste trabalho, cujo objetivo geral foi realizar a análise de sensibilidade relativa da lâmina bruta dos componentes da equação para a determinação dessa lâmina. Como objetivo específico, analisou-se a confiabilidade do uso do método de estimativa da ETo, Hargreaves & Samani, com relação ao método-padrão Penman-Monteith, no processo de obtenção da quantidade de água a ser aplicada com a irrigação, ou lâmina bruta, para o projeto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações gerais

O planejamento tecnicamente correto da irrigação constitui-se na melhor prática para aperfeiçoar significativamente o manejo da água. Os benefícios incluem diminuição do uso da água e energia, redução das perdas por percolação, aumento da quantidade e qualidade de produção e otimização de requerimento de mão-de-obra (LEY et al., 1994a).

Para a compreensão das características de uma equação matemática ou de um modelo matemático, é fundamental o entendimento de cada variável para, então, saber qual o seu papel relativo no modelo. Cada uma delas pode ser estudada individualmente com respeito à sua magnitude, variabilidade e precisão de medida. Porém, entender a importância relativa de cada variável requer uma análise de sensibilidade (SAXTON, 1975).

MELLO (1998), realizando uma detalhada análise de sensibilidade relativa da evapotranspiração de referência aos componentes da equação de Penman-Monteith, definiu o método de determinação de DVP que menor erro causa à ETo estimada.

Uma análise de sensibilidade basicamente é aplicada para determinar os efeitos que os erros nos componentes do modelo causam à variável dependente. Além disso, pode ser usada para classificar os componentes do modelo em ordem relativa de importância (MELLO, 1998).

SAXTON (1975) comentou que, se a mudança da variável dependente de um modelo é estudada com respeito à mudança em cada uma das variáveis independentes, os coeficientes de sensibilidade mostrarão a importância relativa de cada uma delas na resposta do modelo.

De acordo com BEVEN (1979), um dos objetivos fundamentais de uma análise de sensibilidade é mostrar claramente que alcance de precisão é requerido para a introdução de uma variável ou de um componente no modelo e, por conseguinte, onde deverá ser feito o maior esforço na calibração do modelo, uma vez que cada componente tem um grau diferenciado de influência sobre ele.

Por meio do balanço hídrico, verificou-se a quantidade de água atualmente presente no solo, para posteriormente calcular o valor da lâmina bruta de irrigação, ou seja, a quantidade de água a ser aplicada nas culturas. Esse modelo pode conter erros, devido ao emprego de diferentes métodos de estimativa das variáveis presentes. Assim, é desejável determinar a magnitude desses erros associados com essas estimativas. A determinação da sensibilidade relativa da variável dependente, ou saída do modelo, a cada variável independente oferece uma visão clara e objetiva sobre a forma pela qual tais variáveis podem interferir na estimativa da variável dependente.

O monitoramento da água disponível às plantas no solo é um dos componentes fundamentais para o planejamento da irrigação. Possibilita o seu manejo adequado e a correta estimativa da lâmina bruta. Para isso, são imprescindíveis estimativas confiáveis da água disponível armazenada na zona radicular; as projeções da taxa de depleção da água armazenada no solo; uma correta medida da água suprida pela precipitação; e uma estimativa exata da quantidade de água aplicada pela irrigação (BONOMO, 1999). A evapotranspiração da cultura sob condições de campo pode ser determinada pela observação da variação da água do solo num período de tempo.

A determinação da demanda de água ou evapotranspiração da cultura (ETc) do cafeeiro, assim como os coeficientes utilizados no manejo da irrigação, tem sido, atualmente, o grande desafio dos pesquisadores em todo o Brasil e no mundo, os quais vêm procurando caracterizar regionalmente esses fatores, na busca da condição ideal de suprimento hídrico da cultura (BERNARDO, 1995).

FARIA (2003) afirmou que os modelos matemáticos podem simular o balanço hídrico com boa precisão, constituindo ferramentas valiosas para monitorar a disponibilidade de água no solo para as culturas durante as diferentes fases fenológicas e para avaliar riscos de deficiência hídrica, simulando as variações nos componentes hidrológicos com o uso de dados climatológicos de uma série histórica.

2.2. Fatores que influenciam a lâmina de água para irrigação

2.2.1. Profundidade do sistema radicular

É a camada de solo explorada efetivamente pelas raízes, ou seja, compreende a camada desde a superfície até onde se concentra a maior parte das raízes absorventes. Considera-se que a profundidade efetiva é aquela onde estão presentes cerca de 80% do total das raízes absorventes da cultura. No Brasil, para a cultura do café resultados indicam que o valor da profundidade efetiva das raízes varia em valores médios de 0,4 – 0,6 m.

O desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro depende de vários fatores referentes ao solo da área de cultivo, como: textura, estrutura, resistência mecânica, umidade, temperatura, aeração e as características químicas. Segundo RENA (2000), o ambiente edafoclimático é o que mais contribui para a definição da estrutura do sistema radicular. Também, pode ser condicionado pelo sistema de irrigação, pela densidade de plantio, pela espécie e pelo cultivar. Ressalta-se a importância de estudos sobre o desenvolvimento das raízes, uma vez que uma estimativa errada da profundidade do sistema radicular pode levar à subestimativa ou à superestimativa do valor da lâmina de irrigação.

2.2.2. Fator de esgotamento (f)

Representa a fração da água disponível no solo que pode ser consumida entre duas irrigações sucessivas sem que ocorram prejuízos ao desenvolvimento e produção das plantas. O fator *f* relaciona-se com a suscetibilidade da cultura ao estresse hídrico e com o tipo de órgão ou parte da planta que se deseja colher ou maximizar (FISCHER e HAGAN, 1965). Os

valores da fração de esgotamento de água no solo (f) são constantes e dependem apenas da cultura, cujo valor adotado para o cafeeiro é igual a 0,5 (BERNARDO, 1995). Os valores de f dependem da maior ou menor sensibilidade da cultura ao déficit d'água e da demanda evapotranspirométrica da região.

2.2.3. Estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c)

A estimativa da evapotranspiração da cultura envolve duas etapas: a) estima-se a evapotranspiração de referência (ET₀) e b) obtém-se o valor da ET_c pela simples multiplicação da ET₀ por um "coeficiente de cultura", K_c , que varia com o estágio de crescimento de cada cultura. Os valores dos coeficientes podem ser plotados, com o que se obtém uma curva da cultura, constituindo uma distribuição temporal do K_c .

Nas culturas perenes como o cafeeiro, a curva de K_c apresenta valores baixos nos períodos de formação e estabelecimento da cultura no campo. Quando a cultura atinge dossel máximo, a curva de K_c apresenta valores próximos à unidade, ocorrendo oscilações temporais decorrentes de processos fisiológicos e do manejo da cultura. Nas condições do Brasil, no período de vegetação e frutificação, que vai de outubro a maio, o cafeeiro é mais exigente em água. Nas fases de colheita e repouso, de junho a setembro, a necessidade de umidade no solo é pequena (MATIELLO, 1991).

O valor do K_c pode variar com a textura, o teor de umidade do solo, a profundidade e densidade do sistema radicular, as características fenológicas da planta e, até certo ponto, com a velocidade do vento e a umidade relativa do ar. As curvas de cultura são corretamente obtidas experimentalmente. Elas representam o efeito integrado da mudança na área da folha, altura da planta, grau de cobertura e resistência do dossel e albedo sobre a ET_r em relação à cultura de referência (JENSEN et al., 1990). Na literatura são citados valores médios recomendados de K_c para a cultura do cafeeiro, como mostrado no Quadro 1.

O coeficiente de cultura (K_c) relaciona a ET_c para cada cultura com a evapotranspiração da cultura de referência (ET₀). Portanto, na seleção e uso de coeficientes de culturas preestabelecidos a estimativa correta do valor da

Quadro 1 – Valores médios de K_c recomendados por diferentes autores

Coeficiente de Cultura do Cafeeiro			
PEREIRA (1957)	FAO (1977)	CLOWES (1984)	SANTINATO et al. (1997)
0,5-0,8	0,9	0,6	0,8-1,0

ET_0 é fundamental para se obterem estimativas confiáveis de ET_c . Os coeficientes calculados utilizando grama como cultura de referência não devem ser usados com ET_0 de referência da alfafa ou vice-versa. Alguns pesquisadores enfatizam a importância das curvas de cultura para consistência na estimação da evapotranspiração desta (DOORENBOS e PRUITT, 1977; WRIGHT, 1981, 1982).

O coeficiente de cultura (K_c) varia conforme o estágio de desenvolvimento da planta. DOORENBOS e PRUITT (1977) e DOORENBOS e KASSAN (1979) reuniram grande quantidade de informações a respeito das necessidades hídricas das culturas, apresentando um estudo amplo sobre K_c para a maioria das espécies cultivadas comercialmente. O método consiste em dividir o ciclo da cultura em quatro fases de desenvolvimento, definindo um K_c específico para cada fase.

2.2.4. Evapotranspiração da cultura ajustada em função da variação da umidade do solo (k_s) e da localização de aplicação da água (kl)

Segundo Allen et al. (1998), citados por MEDEIROS (2003), o método apresentado para determinar a ET_c objetiva a determinação da evapotranspiração da cultura, sendo o cultivo conduzido em ótimas condições de desenvolvimento e adequadamente manejado, sem estresses hídrico e nutricional. Intrinsecamente, também supõe o suprimento de água na forma de precipitação ou irrigação total (cobrindo toda a área).

O método de irrigação localizada aplica água de forma pontual, não irrigando toda a área, mas promovendo uma redução na evapotranspiração da cultura (ET_c). A magnitude dessa diminuição dependerá de várias

características das partes transpirantes das plantas, como: massa foliar, superfície total das folhas e volume da copa, entre outras (HERNANDEZ ABREU et al., 1987; PIZARRO, 1990). Assim, em irrigação localizada, é necessário fazer uma correção na evapotranspiração da cultura (ET_c) determinada para os demais sistemas de irrigação (SOARES, 1998). Em média, a irrigação localizada molha apenas 1/3 a 2/3 da área. Portanto, necessita de correção devido à localização, que consiste em multiplicar a ET_c por um coeficiente de ajuste específico (KI), cujo valor depende, sobretudo, da porcentagem de área sombreada e, ou, molhada do solo ao longo do ciclo da cultura.

Vários autores (ABREU e SÁNCHEZ, 1987; LOPÉZ et al., 1992; VERMEIREN e JOBLING, 1997) comentaram sobre a aplicação à ET_c, no cálculo das necessidades hídricas das culturas sob irrigação localizada, de um coeficiente de redução KI, ou coeficiente de cobertura. Embora a estimativa precisa desse coeficiente necessite de investigação experimental mais profunda, podem-se utilizar fórmulas empíricas com base no índice de cobertura do solo, que expressa a fração da superfície deste realmente coberta pela folhagem, vista em projeção sobre o plano horizontal.

Constam, na literatura, diversas equações e modelos para determinar o coeficiente de localização ao longo do crescimento da cultura. Os modelos mais práticos para determinar KI são aqueles que se baseiam na porcentagem de área sombreada, que é definida como “a fração da superfície do solo sombreada pela cobertura vegetal ao meio-dia, no solstício de verão, em relação à superfície total” (PIZARRO, 1990).

A redução nos níveis de umidade do solo em períodos após a irrigação ou precipitação, mais evidenciada em cultivos irrigados com turnos de rega maiores, promove decréscimos na energia potencial da água, dificultando a sua absorção pelas plantas, que, mesmo em níveis pequenos, estará em estresse hídrico. Os efeitos deste na evapotranspiração da cultura podem ser descritos utilizando o coeficiente de estresse hídrico (K_s), o qual promoverá um ajuste na ET_c.

O K_s promove o ajuste da evapotranspiração da cultura para a evapotranspiração real em função do nível de umidade do solo ao longo do ciclo de desenvolvimento. Na literatura há diversas proposições para o cálculo

desse coeficiente. A maioria dos pesquisadores acredita que o K_s é igual a 1 e a evapotranspiração real se iguala à evapotranspiração da cultura durante algum tempo após a irrigação, decrescendo rapidamente a partir de determinado valor de umidade do solo, segundo uma forma exponencial (BERNARDO, 1995), comportamento esse evidenciado pelo modelo logarítmico de determinação do K_s .

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Considerações gerais

Para a execução deste trabalho foram realizadas simulações das necessidades hídricas da cultura do café, por meio do software IRRIGA, com base numa série de dados climáticos diários, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), contida no banco de dados do programa, para a cidade de Araguari (latitude 18° 38' sul, longitude 48° 11' oeste e altitude de 921,77 m), no período de quatro anos de cultivo, período abrangendo as fases de plantio até o estabelecimento dos ciclos de produção da planta. Após a obtenção dos dados de entrada do modelo e da lâmina bruta de projeto, tem-se a possibilidade de calcular os erros transmitidos para a lâmina bruta, inerentes à utilização de determinadas metodologias para o cálculo das variáveis independentes, presentes no modelo.

Os dados diários disponíveis foram os seguintes elementos climáticos: temperatura máxima ($T_{máx}$), temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) e temperatura média ($T_{méd}$), horas de brilho solar (n), temperaturas do bulbo seco e do bulbo molhado, umidade relativa média diária do ar (UR) e velocidade média do vento ($U2$). O período de simulação correspondeu a quatro anos de cultivo (2000-2003), abrangendo: o plantio, o desenvolvimento e os primeiros ciclos de produção da cultura do café. Foi considerado como data de plantio o dia 1º de janeiro de 2000.

Consideraram-se as informações de capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a densidade para um solo típico da região, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Composição granulométrica e classificação textural do solo

Características do Solo			
Profundidade	1ª Camada	2ª Camada	3ª Camada
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
	%	%	%
CC	34	32,5	33,5
PM	22	22,5	22,5
Densidade Aparente (g/cm ³)	1,2	1,19	1,18
Composição Granulométrica (%)			
Argila	50	50	50
Areia	20	20	20
Silte	30	30	30
Classificação Textural	Argilosa		
Classe do Solo	Latossolo Vermelho-Amarelo		
VIB	20 mm/h		

Com relação ao cadastro das características da cultura, no programa IRRIGA têm-se os dados que se referem aos índices gerais da cultura. O fator de esgotamento da água considerado se refere à quantidade de água realmente possível de ser utilizada pela cultura entre duas irrigações e sem que haja estresse hídrico, cujo valor adotado para o cafeeiro será igual a 0,5 (BERNARDO,1995). Enquanto o item valor de mercado foi estipulado como médio, a temperatura basal foi de 12,5 °C (AMARAL, 1991) e a ótima de 22 °C, sendo a salinidade máxima permitida no extrato de saturação do solo utilizada de 10 dS m⁻¹ (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

Para o cadastro da propriedade no programa IRRIGA, utilizou-se de dados de entrada que representam as características da cultura para a região em estudo, sendo o sistema escolhido para o estudo o de irrigação localizada (gotejamento). As características do equipamento de irrigação, o espaçamento, o cultivar e o sistema de irrigação são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Características do equipamento utilizado e do cultivo

Características do Equipamento de Irrigação	
Gotejadores	
Modelo	Ram 16 Q
Fábrica	NETAFIM
Tipo	Autocompensante
Pressão de serviço	10 mca
Vazão do emissor	2,3 L/h
Diâmetro do bocal	1,2 mm
Porcentagem de área molhada	25%
CUC	90%
Espaçamento entre emissores	0,75 m
Espaçamento das linhas laterais	4 m
Emissores por metro	1,33
Emissores por planta	66%
Turno de rega	2 dias
Espaçamento entre plantas	0,5 x 4 m

Para uma análise qualitativa dos dados foram excluídos os dias sem irrigação e aqueles que apresentaram recomendação de aplicação de lâmina abaixo de 2 mm, devido à alta variabilidade dos valores dos erros adquiridos na faixa de 0 a 2 mm. Normalmente, a lâmina de água aplicada é superior a 2 mm.

O conceito de eficiência de aplicação de água pelo sistema incorpora os efeitos da uniformidade da irrigação, representando, dessa forma, de maneira adequada, as imperfeições do processo de aplicação de água nas culturas. A

metodologia utilizada para o cálculo da eficiência de irrigação considerou a uniformidade de aplicação da água, as perdas por evaporação e o arraste pelo vento (KELLER e BLIESNER, 1990).

3.2. Lâmina bruta de irrigação

Para o cálculo da lâmina de água a ser aplicada pelo sistema de irrigação, ou lâmina bruta, considerou-se a relação entre a evapotranspiração real do sistema de irrigação localizada e a sua eficiência de aplicação (E_f). Segundo KELLER e BLIESNER (1990), a evapotranspiração de referência sofre penalização de dois coeficientes: o K_s , que depende da diminuição da umidade do solo; e o K_l , que corrige a evapotranspiração da cultura para irrigação. A equação utilizada para obtenção da lâmina bruta de irrigação foi a seguinte:

$$L_B = \frac{ET_0 K_c K_s K_l}{E_{f_1} E_{f_2}} \quad (1)$$

em que:

- L_B = lâmina bruta de irrigação, mm;
- K_c = coeficiente de cultura (adimensional);
- K_s = coeficiente de estresse hídrico (adimensional);
- K_l = coeficiente de localização (adimensional);
- ET_0 = evapotranspiração de referência, mm.dia^{-1} ;
- E_{f_1} = componente da eficiência referente à uniformidade de irrigação; e
- E_{f_2} = componente da eficiência referente às perdas por evaporação e arraste pelo vento ($E_{f_2} = 1$).

Utilizou-se o valor da componente da eficiência para uniformidade de irrigação igual a 90% (0,9) e para o componente da eficiência referente às perdas por evaporação do vento, o valor igual a 1.

3.2.1. Evapotranspiração de referência (ET_o)

Utilizaram-se para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) as metodologias de Penman-Monteith (ALEN et al., 1998) e Hargreaves & Samani (1985), descritas no capítulo 1. Foram realizadas comparações entre os métodos, com o intuito de verificar qual é o nível de erro transmitido à lâmina bruta de irrigação quando se opta pelo uso do método simplificado em relação à utilização do método-padrão FAO.

3.2.2. Coeficiente de cultura (K_c)

Para cadastro no IRRIGA, foram escolhidos os valores médios de K_c em função do espaçamento de plantio de 4 x 0,5 m, totalizando 5.000 plantas por ha, variando também com a idade da lavoura. Dentro do período de crescimento, cada ano foi dividido em três fases, com exceção do 3^o e 4^o, quando os valores de K_c foram próximos ou já atingiram a unidade, como mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Valores médios de K_c adotados nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do café

	Fases	K _c	Área Sombreada %
Ano 1	1a		2
	1b	0,45	5
	1c		15
Ano 2	2a	0,65	20
	2b		25
Ano 3	3a	0,8	30
	3b		40
Ano 4	1	1,00	50

Fonte: SANTINATO et al. (1996).

3.2.3. Coeficiente de estresse hídrico (Ks)

O IRRIGA utiliza dois modelos para o cálculo do coeficiente de estresse (Ks) conforme a percentagem da água disponível no solo. Esse coeficiente é empregado para o cálculo da evapotranspiração real em função do teor de umidade.

A seguir são apresentados os modelos:

- Modelo logarítmico: $K_s = \ln[(U_{midAtual} - PM) + 1] / \ln[(CC - PM)]$
(BERNARDO, 1995) (2)

- Modelo linear: $K_s = (U_{midAtual} - PM) / (CC - PM)$
(KELLER e BLIESNER, 1990) (3)

- Modelo simplificado: $K_s = 1$ (4)

em que:

$U_{midAtual}$ = umidade do solo no dia (%);

PM = ponto de murcha permanente (%); e

CC = capacidade de campo (%).

O modelo selecionado foi o logarítmico (BERNARDO, 1995).

Normalmente, utiliza-se esse modelo, proposto por BERNARDO (1995), ressaltando-se que em solos excessivamente arenosos a utilização do valor de $K_s = 1$ tem sido uma prática para evitar erros significativos. O K_s unitário é usado quando a umidade permanece sempre próxima à capacidade de campo (turnos de rega muito reduzidos)

No caso da utilização de diferentes metodologias para a estimativa da evapotranspiração de referência, o programa IRRIGA permite combinações com os métodos de obtenção do KI e do Ks, citados anteriormente, gerando valores de Ks diferentes e, obviamente, de lâminas de aplicação de água também diferentes. Tais valores são empregados no cálculo da variação

relativa do erro (C_i/C_i) e, posteriormente, na obtenção dos valores de sensibilidade relativa (Sr_i) da lâmina bruta a cada variável independente presente no modelo de aquisição dessa lâmina.

3.2.4. Coeficiente de localização (KI)

O método de irrigação localizada aplica água de forma quase que pontual, não irrigando toda a área, o que diminuiu a evapotranspiração. A queda da evapotranspiração se dá em virtude da redução da área molhada e da área sombreada pela cultura. Alguns pesquisadores desenvolveram coeficientes de localização (KIs) para ajustar a evapotranspiração gerada a partir da irrigação total em evapotranspiração promovida a partir de irrigação pontual. Dois modelos de determinação de KI são utilizados no programa IRRIGA:

- Modelo de Keller (KELLER e BLIESNER, 1990):

$$KI = 0,0085 \times Ps + 0,15 \quad (5)$$

em que Ps é a porcentagem de sombreamento.

- Modelo de Fereres (VILLALOBOS e FERERES, 1990):

Porcentagem de Sombreamento (Ps)	Coeficiente de Localização (KI)
Ps maior que 65%	$KI = 1$ (6)
Ps de 0 a 20%	$KI = 0,0194 \times Ps + 0,1$ (7)
Ps de 20 a 65%	$KI = 0,0108667 \times Ps + 0,2998889$ (8)

Dessa forma, considerando a E_f constante e os valores de K_c variando de acordo com as fases de desenvolvimento da cultura, podem-se expressar os valores de I_B , KI, K_s e E_{To} como funções da umidade real (U_a), K_s , K_c , Ps e E_{To} (Equações 9 e 10, respectivamente).

$$K_s = f(U_a) \quad (9)$$

$$K_l = f(P_s) \quad (10)$$

Assim, L_B pode ser expressa como uma função de P_s , K_s , K_c e ET_o (Equação 11).

$$L_B = f(K_c, U_a, P_s, ET_o) \quad (11)$$

3.3. Análise de sensibilidade

O procedimento referente à análise de sensibilidade foi realizado da seguinte forma: análise de sensibilidade relativa da lâmina bruta de irrigação aos componentes explícitos do modelo de obtenção da lâmina bruta escolhido, assim como a determinação de coeficientes e, separadamente, dos componentes do método de Hargreaves & Samani (ALLEN et al., 1998). A escolha desse método de determinação da ET_o foi feita, principalmente, porque ele se baseia em temperaturas do ar e também por ser o que apresenta melhor adequação às condições climáticas da região e melhor estimativa da ET_o , em comparação com o método de Penman-Monteith-FAO (padrão) (ALLEN et al., 1998), assim como discutido no capítulo 1.

3.3.1. Teoria fundamental da análise de sensibilidade

Considerando a equação de obtenção do valor da lâmina bruta de irrigação (1) e expressando-a na forma implícita, tem-se que:

$$L_B = f(C_1, C_2, \dots, C_n) \quad (12)$$

em que C_1, C_2, \dots, C_n representam os componentes do modelo matemático.

Pode-se escrever que:

$$L_B + \Delta L_B = f(C_1 + \Delta C_1, C_2 + \Delta C_2, \dots, C_n + \Delta C_n) \quad (13)$$

$$\Delta L_B = \frac{\partial L_B}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial L_B}{\partial C_2} \Delta C_2 + \dots + \frac{\partial L_B}{\partial C_n} \Delta C_n \quad (14)$$

em que as derivadas parciais definem a sensibilidade da estimativa para cada componente ou variável.

A metodologia utilizada foi definida por McCuen (1973), conforme MELLO (1998), em que a determinação da sensibilidade relativa da variável em questão (L_B) forneceu, a cada componente do cálculo da lâmina bruta de irrigação ou da equação em estudo, uma análise geral da importância relativa de todos os componentes no modelo. A sensibilidade relativa (Sr_i) da lâmina bruta de água a ser aplicada pelo sistema, a um componente C_i qualquer do seu processo de obtenção, é definida como:

$$Sr_i = \frac{\partial L_B}{\partial C_i} \frac{C_i}{L_B} \quad (15)$$

Por meio dessa análise, pode-se conhecer a sensibilidade relativa da L_B a cada componente no modelo em questão, o que permite uma visão geral da importância de todos os componentes desse modelo.

De acordo com SAXTON (1975), o erro relativo pode ser expresso da seguinte forma:

$$E_{rr} = \frac{\Delta E}{E} \quad (16)$$

$$C_{err} = \frac{\Delta C_i}{C_i} \quad (17)$$

em que:

E_{rr} = erro relativo nas variáveis dependentes; e

C_{err} = erro relativo em qualquer variável independente.

Logo, pode-se considerar E como L_B e C_i um componente qualquer da equação de determinação da lâmina bruta de projeto. Substituindo a Equação 14 na 16, tem-se:

$$L_B = \frac{\frac{\partial L_B}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial L_B}{\partial C_2} \Delta C_2 + \dots + \frac{\partial L_B}{\partial C_n} \Delta C_n}{L_B} \quad (18)$$

Colocando C_i em evidência na Equação 17, tem-se:

$$\Delta C_i = C_{err} C_i \quad (19)$$

Inserindo a Equação 19 na 20, obtém-se:

$$L_{Brr} = \left(\frac{\partial L_B}{\partial C_1} \frac{C_1}{L_B} \right) C_{err1} + \left(\frac{\partial L_B}{\partial C_2} \frac{C_2}{L_B} \right) C_{err2} + \dots + \left(\frac{\partial L_B}{\partial C_n} \frac{C_n}{L_B} \right) C_{errn} \quad (20)$$

Substituindo a Equação 16 na 20 e o erro relativo em L_B , o erro relativo causado pela variação nos componentes C_1, C_2, \dots, C_n será:

$$L_{Brr} = \left(\frac{\partial L_B}{\partial C_1} \frac{C_1}{L_B} \right) \frac{\Delta C_1}{C_1} + \left(\frac{\partial L_B}{\partial C_2} \frac{C_2}{L_B} \right) \frac{\Delta C_2}{C_2} + \dots + \left(\frac{\partial L_B}{\partial C_n} \frac{C_n}{L_B} \right) \frac{\Delta C_n}{C_n} \quad (21)$$

O termo entre parêntese corresponde à sensibilidade relativa da L_B a cada componente C_1, C_2, \dots, C_n . Tem-se, então, a equação geral do erro relativo da L_{Bi} aos componentes do modelo do balanço de água no solo:

$$L_{Brr} = Sr_1 \frac{\Delta C_1}{C_1} + Sr_2 \frac{\Delta C_2}{C_2} + \dots + Sr_n \frac{\Delta C_n}{C_n} \quad (22)$$

A Equação 22 representa o erro transferido à L_B em razão da interação dos erros ocorridos na determinação dos componentes do modelo para obtenção da lâmina bruta de irrigação para o projeto.

No caso de uma análise isolada de cada componente do modelo, o que é de interesse neste estudo, a Equação 22 resume-se somente ao termo referente ao componente cuja interferência em L_B está se analisando. Assim, todos os outros termos serão desconsiderados (MELLO, 1998).

3.3.2. Procedimento para obtenção das derivadas parciais dos componentes da equação de aquisição da lâmina bruta de irrigação para projeto

Pela Equação 1 de obtenção do valor da lâmina bruta para projeto, já descrita neste capítulo, observa-se que a L_B é uma variável dependente, e todas as demais são as variáveis independentes do modelo em questão, variando seus valores conforme a metodologia aplicada.

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B à evapotranspiração de referência (ET_0)

$$\frac{\partial L_B}{\partial ET_0} = \frac{Kc Ks Kl}{Ef_1 Ef_2} \quad (23)$$

$$Sr_{ET_0} = \left(\frac{\partial L_B}{\partial ET_0} \right) \frac{ET_0}{L_B} \quad (24)$$

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B ao coeficiente de estresse hídrico do solo (Ks)

$$\frac{\partial L_B}{\partial Ks} = \frac{Kc Kl ET_0}{Ef_1 Ef_2} \quad (25)$$

$$Sr_{Ks} = \frac{\partial Lb}{\partial Ks} \frac{Ks}{L_B} \quad (26)$$

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B ao coeficiente de localização (Kl)

$$\frac{\partial L_B}{\partial Kl} = \frac{Kc Ks ET_0}{Ef_1 Ef_2} \quad (27)$$

$$Sr_{Kl} = \frac{\partial Lb}{\partial Kl} \frac{Kl}{L_B} \quad (28)$$

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B ao coeficiente de cultura (Kc)

$$\frac{\partial L_B}{\partial Kc} = \frac{Kl Ks ET_0}{Ef_1 Ef_2} \quad (29)$$

$$Sr_{Kc} = \frac{\partial L_B}{\partial Kc} \frac{Kc}{L_B} \quad (30)$$

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B à eficiência de aplicação do sistema de irrigação (Ef)

Para o componente da eficiência referente à uniformidade de irrigação (Ef_1), tem-se:

$$\frac{\partial L_B}{\partial Ef_1} = \frac{Kc Kl ET_0 Ks}{Ef_2} \quad (31)$$

$$Sr_{Ef_1} = \frac{\partial L_B}{\partial Ef_1} \frac{Ef_1}{L_B} \quad (32)$$

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B à porcentagem de sombreamento (P_s)

Derivando as Equações 5 e 6 referentes ao cálculo do kl , pelo modelo de Fereres (1990), tem-se:

$$\frac{\partial Kl_i}{\partial P_{s_i}} = a \quad (33)$$

O coeficiente “a” varia conforme a porcentagem de sombreamento. A seguir são apresentados os valores para “a”:

Ps de 0 a 20%	$a = 0,0194$
Ps de 20 a 65%	$a = 0,0108667$

$$Sr_{P_s} = \left(\frac{\partial L_B}{\partial Kl} \frac{\partial Kl}{\partial P_s} \right) \frac{P_s}{L_B} \quad (34)$$

Derivada parcial e sensibilidade relativa da L_B umidade atual do solo (U_a)

Considerando, para o cálculo, o modelo logarítmico (BERNARDO, 1995) e derivando a Equação 2, tem-se:

$$\frac{\partial K_s}{\partial U_a} = \frac{1}{(U_a - PM) \ln(CC - PM)} \quad (35)$$

$$Sr_{U_a} = \left(\frac{\partial L_B}{\partial K_s} \frac{\partial K_s}{\partial U_a} \right) \frac{U_a}{L_B} \quad (36)$$

3.4. Determinação do erro relativo das variáveis independentes

O erro relativo das variáveis independentes foi determinado utilizando-se a Equação 20 (SAXTON, 1975). Para a determinação da variação dos valores do erro de qualquer variável independente, usou-se a relação entre os métodos contidos no programa IRRIGA, referente à determinação dos valores de ET_o ,

Ks e KI, excluindo-se as variáveis Kc e Ef, que foram determinados pela indução da variação entre os valores. Para o Kc, utilizou-se uma variação de $\pm 0,2$ do valor estipulado para cada fase de desenvolvimento da cultura. O valor da variação da Ef foi feito, determinando-se uma faixa de 5%.

Consideraram-se as seguintes combinações para o cálculo da lâmina bruta de irrigação: os métodos de Penman-Monteith (ALEN et al., 1998) e Hargreaves e Samani (1985), para estimativa da Eto; o modelo logarítmico (BERNARDO, 1995) e linear, para o cálculo do Ks; e os coeficientes de penalização da ETo para irrigação localizada (KI), definidos por Fereres (FERERES, 1990) e Keller (KELLER e BLIESNER, 1990).

Para o cálculo do erro relativo (C_i/C_i) das variáveis independentes, compararam-se os valores estimados pelos métodos que promovem uma menor penalização no valor da ETo, em detrimento daqueles que impõem maior penalização no valor da ETo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Coeficientes de sensibilidade relativa da lâmina bruta (L_B) para projeto de irrigação em relação às variáveis analisadas

Nos Quadros 5 e 6 são apresentados os valores médios dos coeficientes de sensibilidade relativa aos componentes analisados no modelo de determinação da lâmina bruta (L_B) para o projeto e os respectivos erros relativos, determinados em função dos dados climáticos da cidade de Araguari, MG, no período de quatro anos de cultivo da cultura do café, abrangendo desde o plantio até o estabelecimento da produção da planta.

Foram excluídos os dias sem irrigação e aqueles que apresentaram recomendação de aplicação de lâmina abaixo de 2 mm, devido à alta variabilidade dos valores do erro relativo na faixa de 0 a 2 mm. Normalmente, na prática a lâmina aplicada é superior a 2 mm. O sistema escolhido para o estudo foi o de irrigação localizada (gotejamento). Para esse tipo de sistema, considera-se, no cálculo da lâmina bruta de projeto, o coeficiente de localização de aplicação (KI), que penaliza a evapotranspiração máxima da cultura em função da área sombreada ou molhada, aproximando-a da evapotranspiração real.

Para a obtenção dos parâmetros necessários ao cálculo dos valores de sensibilidade relativa (Sr_i) da lâmina bruta, a cada variável independente do modelo, e do erro máximo ocorrido, referente à utilização de determinada

Quadro 5 – Valores médios dos coeficientes de sensibilidade relativa dos componentes evapotranspiração de referência (ET_o), coeficiente de estresse hídrico do solo (K_s) e coeficiente de localização (K_l), no modelo de determinação da lâmina bruta (L_B), para projeto de irrigação; do erro relativo médio transferido; e dos respectivos valores do desvio-padrão

Componentes	Sensibilidade Relativa	Erro Médio	Desvio-Padrão
1 - Evapotranspiração de referência (ET_o)	Sr_i	%	%
Hargreaves & Samani +Kl (Keller) + Ks (Log) + 90 %	0,51	3,40	0,50
Hargreaves & Samani + Kl (Keller) + Ks (Linear) + 90 %	0,47	3,10	0,30
Hargreaves & Samani + Kl (Fereres) + Ks (Log) + 90% (Ef)	0,51	3,40	0,56
Hargreaves & Samani + Kl (Fereres) + Ks (Linear)+ 90% (Ef)	0,59	3,90	0,60
2 – Ks			
Logarítmico			
a – Penman + Keller (1)	0,37	0,40	0,15
b – Penman + Fereres (2)	0,51	0,90	0,20
c – Hargreaves + Keller (3)	0,38	0,42	0,15
d – Hargreaves + Fereres (4)	0,52	0,93	0,22
3 – Kl			
Fereres			
a - Penman + Ks (Log)	0,51	17,57	3,20
b - Penman + Ks (Linear)	0,48	16,90	3,00
c - Hargreaves + Ks (Log)	0,51	17,80	3,60
d - Hargreaves + Ks (Linear)	0,50	17,06	4,20

Quadro 6 – Valores médios do coeficiente de sensibilidade relativa da lâmina bruta (L_B) aos componentes analisados no modelo de determinação da L_B para projeto de irrigação

Componentes	Sensibilidade Relativa	Erro Médio	Desvio-Padrão
1 - Umidade Atual (U_a)	Sr_i	%	%
Logarítmico (K_s)			
a - Penman + Keller (1)	0,03	0,03	0,014
b - Penman + Fereres (2)	0,04	0,08	0,020
c - Hargreaves + Keller (3)	0,03	0,03	0,016
d - Hargreaves + Fereres (4)	0,05	0,09	0,040
2 – Percentagem de Área Sombreada (P_s)			
Fereres (K_I)			
a - Penman + K_s (Log)	0,003	0,11	0,06
b - Penman + K_s (Ln)	0,003	0,11	0,06
c - Hargreaves + K_s (Log)	0,003	0,11	0,07
d - Hargreaves + K_s (Ln)	0,003	0,11	0,06

metodologia para a aquisição desses parâmetros, foram realizadas combinações entre os métodos, fixando-se os valores resultantes da metodologia em questão e variando os outros parâmetros. Por exemplo, para o cálculo da sensibilidade relativa (Sr_i) da lâmina bruta, fixou-se o valor do KI, obtido por meio da metodologia de Fereres, e variaram-se apenas as outras variáveis, como: ETo e Ks.

4.2. Determinação da variação do erro relativo, decorrente do uso de metodologias de determinação das variáveis presentes no modelo de determinação da LB

O erro relativo nas variáveis independentes representa a variação média do erro cometido, decorrente da escolha de determinada metodologia para cálculo das variáveis, com relação a métodos que impõem uma maior penalização ou maior eficiência, presentes no modelo de determinação da lâmina bruta; como é o caso do método de Penman-Monteith, consagrado como método-padrão FAO.

No caso da utilização de diferentes metodologias, para a estimativa da evapotranspiração de referência o programa IRRIGA permite combinações com os métodos anteriormente citados de obtenção do KI e do Ks, o que gera valores de Ks e, obviamente, de lâminas de aplicação de água também diferentes. Esses valores foram utilizados para o cálculo da variação relativa do erro (C_i/C_j) e, posteriormente, para a obtenção dos valores de sensibilidade relativa (Sr_i) da lâmina bruta a cada variável independente presente no modelo de aquisição dessa lâmina.

Esse erro também pode ser representado pela variação induzida ou advinda de sensores específicos de medição. Os métodos escolhidos para determinação dessas variáveis, assim como seus erros relativos, são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 – Valores médios dos erros relativos das variáveis independentes e os métodos utilizados para sua determinação

Componentes	Métodos Utilizados		C_i / C_i
	A	b	$(a - b) / a$ %
ETo	Hargreaves & Samani	Penman-Monteith	6,60
Ks (1)	Logarítmico	Linear	1,80
Kl	Fereres	Keller	34,00

4.3. Análise da sensibilidade relativa da L_B à evapotranspiração de referência (ETo)

Conforme apresentado no Quadro 5, os erros que poderão ocorrer no valor da lâmina bruta de irrigação (L_B), advindos da utilização do modelo de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) Hargreaves & Samani, dependendo da combinação com outros parâmetros, ocasionaram um erro relativo máximo de 2,9% quando comparados com a utilização do método-padrão Penman-Monteith FAO. A sensibilidade relativa da L_B à ETo (Hargreaves & Samani) foi, em média, igual a 0,52.

As combinações entre o método de Hargreaves & Samani com os métodos que determinam os coeficientes Kl e Ks, com maior penalização do valor da evapotranspiração da cultura, apresentaram maiores valores de Sri e do erro relativo máximo.

O método de Penman-Monteith apresenta maior rigor na estimativa da Eto, por considerar os componentes de radiação solar e aerodinâmicos, não presentes no modelo de Hargreaves & Samani. A lâmina bruta apresentou maior sensibilidade relativa aos componentes da equação de Hargreaves, em razão de se utilizarem somente dados de temperaturas máxima, mínima e média. Com a disponibilidade de todos os dados climáticos exigidos pela equação de Penman-Monteith, deve-se optar pelo seu uso. No entanto, o erro relativo transferido pela componente ETo pode ser considerado baixo, em

comparação com os valores dos coeficientes das demais variáveis, presentes no modelo de determinação da lâmina bruta.

4.4. Análise da sensibilidade relativa da LB ao coeficiente de estresse hídrico do solo (K_s)

No sistema de irrigação por gotejamento, o teor de umidade do solo permanece elevado, próximo à capacidade de campo (CC), devido ao fato de esse sistema caracterizar-se pela aplicação localizada de água à alta frequência. O teor de umidade atual do solo (U_a) influencia diretamente a variação dos coeficientes de sensibilidade relativa (K_s) da lâmina bruta de irrigação. O valor de K_s aproxima-se da unidade ($K_s=1$) para umidade próxima à capacidade de campo, permanecendo assim nos períodos de baixa demanda de irrigação. À medida que a umidade diminui, os valores oscilam mais, sofrendo influência maior da perda de umidade, conforme pode ser observado na Figura 1.

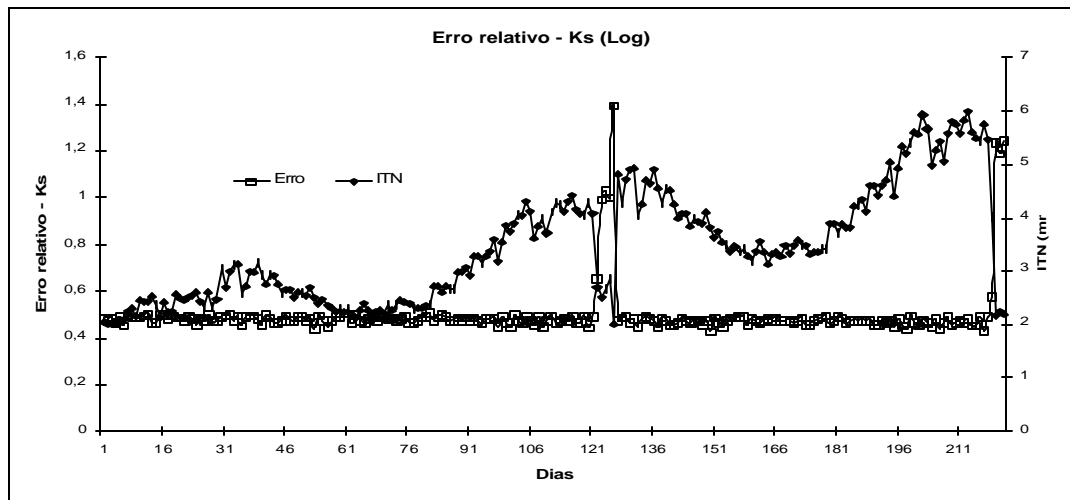


Figura 1 – Variação da irrigação total necessária e do erro relativo máximo transferido à L_B ao longo do período estudado, utilizando-se a combinação do modelo logarítmico (K_s) com Penman-Monteith (ET_o) e Keller (KI).

No Quadro 5, tanto na relação logarítmica quanto na linear, a metodologia de Fereres apresenta o erro relativo duas vezes maior quando comparado com Keller, indicando que, quanto menor a penalização, maior o erro transmitido na estimativa da lâmina bruta. Para o presente estudo, a estimativa da ETo pela equação de Penman-Monteith com o modelo logarítmico para determinação do ks, combinado com o modelo de Keller, gerou resultados mais precisos de valores da lâmina bruta de irrigação, apresentando valor de coeficiente de sensibilidade relativa da L_B igual a 0,37 (Quadro 5). Considerando na Equação 23 somente o componente ks, o erro máximo causado na L_B , em razão do erro de 1,09% nesse componente, será de 0,90%, quando combinado com o método de Fereres, ou seja, para o erro de utilização do método logarítmico com relação ao método Linear, o erro é praticamente desprezível, se for considerado isoladamente.

4.5. Análise da sensibilidade relativa da L_B ao coeficiente de localização (KI)

O coeficiente de localização (KI) é um dos mais importantes na estimativa da L_B . No caso da utilização da metodologia de Fereres para a estimativa do KI, com relação ao método de Keller, a variação do erro relativo é muito alta, 34% (Quadro 7), transferindo-se juntamente com os coeficientes de sensibilidade relativa da L_B ao KI. De acordo com as combinações dos métodos de determinação das variáveis ETo e Ks, o erro relativo poderá variar de 16,90% até o máximo de 17,80% (Quadro 5). A combinação entre os métodos que determinou maior erro foi a de KI (Fereres) com o método de Hargreaves & Samani (ETo) e o Ks (logarítmico).

4.6. Análise da sensibilidade relativa da L_B à umidade atual de água no solo (U_a)

Utilizou-se a Equação 5 para a determinação da sensibilidade relativa (Sr_i) da U_a . A variação do erro relativo transferido pela utilização do método logarítmico pode ser da ordem de 1,09 até 1,80% (Quadro 7), dependendo da combinação com outras variáveis (ETo e KI) do modelo em estudo. Observa-

se, nesse quadro, a relação inversamente proporcional do erro relativo máximo com o nível de penalização de cada método combinado, ou seja, quanto maior a penalização do método utilizado, menor o erro relativo máximo gerado.

A combinação entre os métodos que apresentou maior erro relativo foi a que utilizou Hargreaves & Samani (ETo) e Fereres (KI), 0,09% (Quadro 6), justificando a discussão anterior com relação ao Ks. Praticamente não houve variação entre os valores do erro de sensibilidade relativa e do erro relativo das diferentes combinações.

4.7. Análise da sensibilidade relativa da LB à percentagem de área sombreada (Ps)

Na análise feita neste trabalho, o coeficiente de sensibilidade relativa da L_B à percentagem de área sombreada não variou, apresentando valores iguais a 0,003%, baixos quando comparados com os coeficientes das demais variáveis do sistema. Porém, ao utilizar a metodologia de Fereres em vez da de Keller para a determinação do KI, pode-se transferir um erro relativo de até 34%, elevando o erro relativo máximo à L_B em torno de 0,11% (Quadro 6). Estatisticamente, não houve diferença significativa entre as respectivas variâncias dos coeficientes calculados pelas diferentes combinações, utilizando-se o teste F a 5% de probabilidade. Observa-se, na Figura 2, que a variação do erro relativo máximo no período selecionado para estudo aumentou com o incremento da área sombreada e com a diminuição das lâminas recomendadas.

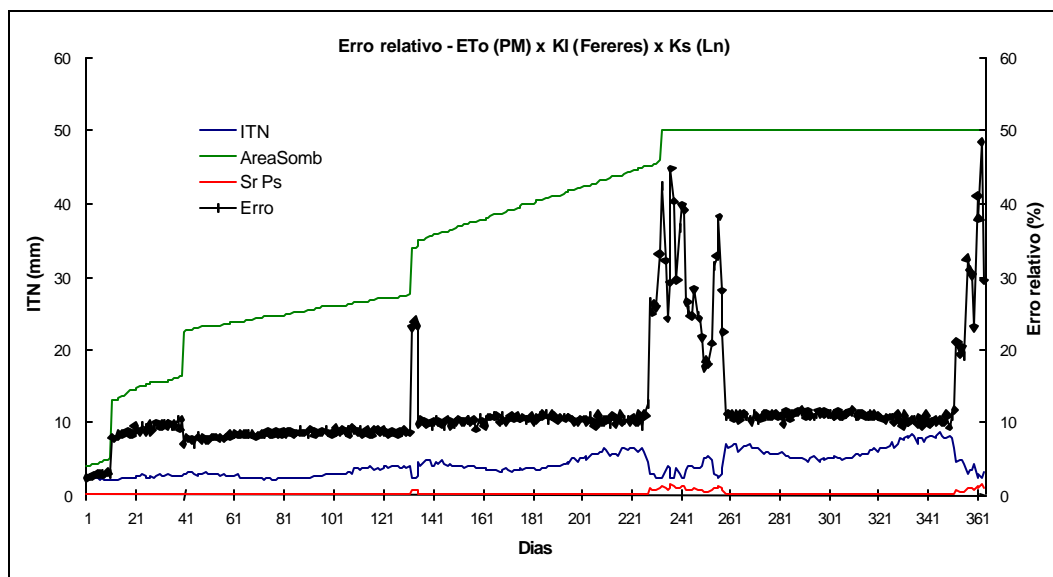


Figura 2 – Variação da irrigação total necessária, da percentagem da área sombreada (Ps) e do erro relativo máximo transferido à L_B ao longo do período estudado, utilizando-se a combinação do modelo linear (Ks) com Penman-Monteith (ETo) e KI (Fereres).

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi feita a análise de sensibilidade da equação de obtenção da lâmina bruta de irrigação de projeto, por meio de simulações dos valores das variáveis (independentes) presentes na equação e do valor da própria lâmina bruta de irrigação (variável dependente). Os coeficientes de sensibilidade relativa da lâmina bruta (L_B) determinados foram os seguintes componentes: evapotranspiração de referência (ET_0), coeficiente de estresse hídrico (K_s), coeficiente de cultura (K_c) e coeficiente de localização (K_l) e a eficiência de aplicação de água pelo sistema de irrigação (E_f).

Para a execução do trabalho foram realizadas simulações das necessidades hídricas da cultura do café, com o auxílio do software IRRIGA, com base numa série de dados climáticos diários do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), contida no banco de dados do programa, e condições específicas de clima, solo e cultura, para a cidade de Araguari (latitude $18^\circ 38'$ sul, longitude $48^\circ 11'$ oeste e altitude de 921,77 m), no período de quatro anos de cultivo, abrangendo as fases de plantio até o estabelecimento dos ciclos de produção da planta. O sistema de irrigação utilizado foi o de gotejamento.

Foram excluídos os dias sem irrigação e aqueles que apresentaram recomendação de aplicação de lâmina abaixo de 2 mm, devido à alta variabilidade dos valores do erro relativo na faixa de 0 a 2 mm.

Com base nos resultados, pode-se concluir que:

O coeficiente de sensibilidade relativa (S_r) referente à utilização do método de Hargreaves & Samani (1985) para a estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}) no cálculo da lâmina bruta de irrigação (L_B) para projeto de irrigação variou de 0,47 a 0,60, com a ressalva de que, para um S_r igual a 0,51, a variação de 1 mm no valor estimado de E_{To} pelo método avaliado com relação ao método-padrão FAO, Penman-Monteith, implica erro de 0,5 mm no valor da lâmina bruta de irrigação.

A determinação dessa lâmina foi mais sensível ao KI, com coeficiente de sensibilidade relativa apresentando valores médios de 0,48 a 0,51. É possível o erro médio transferido à L_B variar de 16,90 a 17,80%, evidenciando-se que o termo KI pode requerer maior correção nos seus valores, com relação aos demais componentes, para fins de irrigação nas condições das localidades do estudo.

O maior coeficiente de sensibilidade relativa entre as variáveis analisadas foi o referente à utilização do método de Hargreaves & Samani combinado com os métodos de Fereres (KI) e logarítmico (K_s), apresentando valor de aproximadamente 0,6, com transferência de um erro médio cerca de 4% menor e S_r de 0,003, referente à percentagem de área sombreada, praticamente desprezível quando comparado com os outros componentes.

Comparando a lâmina bruta (L_B) estimada utilizando o método-padrão Penman-Monteith para a estimativa da E_{To} de 3,40 mm d^{-1} e o método de Hargreaves & Samani de 3,45 mm d^{-1} , que superestimou o valor da L_B , verificou-se que não houve diferença significativa (0,05 mm d^{-1}), correspondendo a apenas 1,2% do valor estimado pelo método de Hargreaves & Samani.

O valor do erro médio da L_B em relação à eficiência de irrigação foi igual a 2,42%, nas condições edafoclimáticas locais do estudo e considerando a variação relativa de 5,5% (85 – 90%).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. M. H.; SBBÁNCHEZ, J. R. C. Riego localizado. Diseño agronómico, obturaciones e fertigación. In: CURSO INTERNACIONAL DE RIEGOS. **Anales...** Brasília: [s. n.], 1987. 194 p.
- ALLEN R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A., PEREIRA, L. S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p.1-34,1994.
- ALLEN, R. G.; W. O. Pruitt. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. **J. Irrigation and Drainage ASCE**, v. 112(IR2), p. 139-155, 1986.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).
- AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J. D. Comparison of methods for estimating REF-ET. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, n. 6, p. 427-435, 1995.
- ANTUNES, R. C. B. **Determinação da evapotranspiração e influência da fertirrigação em componentes vegetativos, reprodutivos e nutricionais do café arábica**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 2000. 162 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- ARAÚJO, J. A. C. **Análise do comportamento de uma população de café icatu (H – 4784 – 7) sob condições de irrigação por gotejamento e quebra-vento artificial**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1982. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1995. 657 p.
- BERTUZZI, P.; BRUCLER, L.; BAY, D.; CHANZY, A. Sampling strategies for soil water content to estimate evapotranspiration. **Irrigation Science**, v. 14, p. 105-115, 1994.
- BEVEN, K. A sensitivity analyses of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. **Journal of Hydrology**, v. 44, p. 169-190, 1979.
- BONOMO, R. **Análise da irrigação na cafeicultura em áreas de cerrado de Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1999. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- BONOMO, R.; GOMES FILHO, R. R.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M. Caracterização hidráulica de tubos perfurados flexíveis de polietileno. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 3, p. 60-69, 1998.
- BONOMO, R.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, GC. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para regiões cafeeiras do Triângulo e Noroeste de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998. Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas, 1998. v. 1, p. 307-309.
- CAIXETA, G. Z. T. Economia cafeeira, mercado do café, tendências e perspectivas. In: ENCONTRO SOBRE PRODUÇÃO DE CAFÉ DE QUALIDADE, 1999, Viçosa. **Livro de Palestras...** Viçosa, MG: UFV-Departamento de Fitopatologia, 1999. p. 3-21.
- CAMARGO, A.P. Prescrição de regas para o cafezal em área de seca prolongada de inverno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFFEEIRAS, 15., 1989, Maringá. **Resumos...** Maringá, PR: [s. n.], 1989. p. 65-70.
- CAMARGO, A.P.; PEREIRA, A.R. **Prescrição de rega por modelo climatológico**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1990. 27 p.
- CHANG, J. **Climate and agriculture**. 2. ed. Chicago: Aldine Publishing Company, 1971. 296 p.
- COSTA, L.C.; MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.A.; LEAL, B.G. **SISDA**: a decision support system for agriculture in Brazil. System Analysis. Wageningen: [s. n.], 1998. n. 16, p. 33-39.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage, 24).

- FARIA, R. T. Simulação do balance hídrico do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro, BA: [s. n.], 2003. p. 79.
- FERERES, E. Irrigation scheduling: the state of art. In: HELLENIC HIDROTECNICAL CONGRESS ON WATER RESOURCES AND REGIONAL DEVELOPMENT, 4., 1990, Athens. **Proceedings...** Athens: [s.n.], 1990. p. 755-768.
- FREVERT, D.R.; HILL, R.W.; BRAATEN, B.C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrig. And Drain. ENG. ASCE**, v. 109, p. 265-270, 1983.
- GUTIÉRREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Estimating water use and irrigation requeriments of coffee in Hawaii. **Jornual of American Society Horticultural Science**, v. 119, n. 3, p. 652-657, 1994.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago: Amer. Soc. Agric. Eng. Meeteng, 1985. (Paper 85 -2517).
- HATFIELD, J. L.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, n. 5, p. 301-308, 1996.
- HERNANDEZ ABREU, J. M.; PEREZ REGALADO, A.; RODRIGO LOPEZ, J.; GONZALEZ HERNANDEZ, J. F. **El riego localizado**. Curso internacional de riego localizado. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987. 317 p.
- JENSEN, M.E. (Ed.). **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1973.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requeriments**. New York: ASCE, 1990. 332 p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.
- LEY, T. W.; HILL, R. W.; JENSEN, D. T. Errors in Penman-Wright alfafa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. **Transaction of ASAE**, v. 37, n. 6, p. 1853-1861, 1994a.
- LOPÉZ, R. J.; ABREU, J. M. H.; REGALO, A. P.; HERNÁNDEZ, J. F. **Riego localizado**. Madri: Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 205 p.
- MANTOVANI, E. C. A irrigação do cafeeiro. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**, n. 48, p. 45-49, 2000.

- MANTOVANI, E. C. **Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos**. Córdoba: ETSIA, Depto. Agronomía, 1993. 184 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – ETSIA/Córdoba.
- MANTOVANI, E.C. Avaliação de métodos para estimativa da ET de referência para Viçosa, MG - Brasil. **Anais do X CONIRD**: Salvador: [s. n.], 1994. p. 47-60.
- MANTOVANI, E.C. **Gerenciamento e manejo da irrigação**. Brasília: ABEAS, 1996. 75 p. (CURSO DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO DE PROJETOS HIDROGRÁFICOS – Módulo 08).
- MANTOVANI, E.C.; COSTA, L.C.; LEAL, B.G. SISDA — Sistema de Suporte à Decisão Agrícola. **Anais do Agrosoft**, 1997. [S. l.: s. n.], 1997. p. 377-382.
- MATIELLO, J. B. **O café** – Do cultivo ao consumo. São Paulo: Globo, 1991. 320 p
- MATIELLO, J. B.; MIGUEL, A. E.; VIEIRA, E.; ARANHA, E. Novas observações sobre os efeitos hídricos no pagamento da florada de cafeeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEEIRA, 21., 1995, Caxambu. **Anais...** Caxambu, MG: [s. n.], 1995. p. 60.
- McCUEN, R. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, v. 18, p. 37-53, 1973.
- MEDEIROS, H. M. **Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura do tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 2002. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MELLO, J. P. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1998. 79 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- PEREIRA JR., J. S. Por que gerir os recursos hídricos? **Agroanalysis**, v. 18, n. 3, p. 16-19, 1998.
- PEREIRA, A. A.; SAKYIAMA, N. S. Cultivares melhoradas de café Arábica. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **I encontro sobre produção de café com qualidade**. Viçosa, MG: UFV/DFP, 1999. p. 241-257.
- PEREIRA, G. M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. Viçosa, MG: UFV, 1995. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

- PEREIRA, L. S.; ADAIXO, M. S. Lysimeter-based evapotranspiration research in Portugal. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 142-150, 1994.
- PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF):** goteo, microaspersión, exudación. 2. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1990. 471 p.
- REIS, G. N.; MIGUEL, A. E.; OLIVEIRA, J. A. Efeito da irrigação, em presença e ausência da adubação NPK, em cafeeiros em produção - Resultados de 3 produções - em Caratinga - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEIRAS, 16, 1990. Espírito Santo do Pinhal. **Anais...** Espírito Santo do Pinhal, SP: [s. n.], 1990. p. 19-21.
- RENA, A.B.; MAESTRI, M. Relações hídricas no cafeeiro. **Revista ITEM**, n. 48, p. 34-41, 2000.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café.** São Paulo: ARBORE, 1996. 146 p.
- SANTINATO, R.; GONZAGA, A.; NEVES, C.P.; SENNA, C.A.; SILVA, A.A. Modo de adubação NK do cafeeiro irrigado por gotejamento em região com déficit hídrico limitante à cultura de Coffea arabica - Fase de formação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 15., 1989, Maringá. **Anais...** Maringá, PR: [s. n.], 1989. p. 225-227.
- SAXTON, K. E. Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation. **Agricultural Meteorology**, v. 15, p. 343-353, 1975.
- SCALOPI, E. J. Exigências de energia para irrigação. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**, v. 21, n. 2, p. 13-17, 1985.
- SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração:** necessidade de água para as plantas cultivadas. Brasília: ABEAS, 1996. 173 p. (CURSO DE ENGENHARIA E MANEJO DE IRRIGAÇÃO. Módulo 2).
- SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; LEAL, B. G. Relações clima-água-planta. In: FARIA, M. A.; SILVA, E. L.; VILELA, L. A. A.; SILVA, A. M. (Eds.). **Manejo de irrigação.** Poços de Caldas, MG: UFLA/SBEA, 1998. p. 46-85.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements.** Rome, Italy: Land and Water Development Division of Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991. 21 p.
- SOARES, A. A. **Irrigação por aspersão e localizada.** Brasília: ABEAS, 1998. 91 p.
- SOUZA, E. F. **Modelo computacional aplicado ao manejo e planejamento de irrigação.** Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1993. 65 f. Dissertação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

- SOUZA, J. L. M.; FRIZZONE, J. A. Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISAS EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 4., 2001. Araguari. **Anais...** Araguari, MG: [s. n.], 2001. p. 48-52.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Ver.**, v. 38, p. 55-94, 1948.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. Tradução de GHEYI, H. R.; DAMASCENO, F. A. V.; SILVA J. R., L. G. A.; MEDEIROS, J. F. Campina Grande, PB: UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).
- VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 1153-1159, 1990.
- WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Irrig. and Drain. Div.**, v. 108, n. IRI, p. 57-74, 1982.
- ZAMORA, E.; SANCHEZ, Y. Cálculo de las necesidades hídricas del cafeeiro en Cuba, mediante metodos de simulacion. **Ciencias del Suelo, Riego y Mecanizacion**, v. 2, n. 1, p. 29-40, 1992.
- ZANINI, J. R.; OLIVEIRA, J. C.; PAVANI, L. C.; PEDROSO, P. A.; VALIM, M. R. Efeito da irrigação no desenvolvimento vegetativo de cafeeiros novos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., 1994, Campinas. **Separata...** Campinas, SP: [s. n.], 1994. 30 p.