

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA
PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS**

LUIS CÉSAR DE AQUINO LEMOS FILHO

2005

LUIS CÉSAR DE AQUINO LEMOS FILHO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O
ESTADO DE MINAS GERAIS**

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

Orientador

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2005**

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

Lemos Filho, Luis César de Aquino

Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para o estado de Minas Gerais / Luis César de Aquino Lemos Filho. – Lavras : UFLA, 2005.
76 p. : il.

Orientador: Luiz Gonzaga de Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - UFLA.
Bibliografia.

1. Meteorologia. 2. Variabilidade espaço-temporal. 3. Sistema de informação geográfica. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-551.572

LUIS CÉSAR DE AQUINO LEMOS FILHO

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O
ESTADO DE MINAS GERAIS**

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

APROVADA em 5 de agosto de 2005

Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista – UFLA

Prof. Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho – UFLA



Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2005**

A DEUS, pelo amor e iluminação concedidos em todas as horas.

Aos meus pais, Luis César de Aquino Lemos
e Cleide Michiles Lemos,

OFEREÇO.

À minha querida companheira, Lívia Lessa.

À minha família, em especial aos meus irmãos Andréa, William e Wellington.

À minha tia Eliete, por todo o apoio dado aos meus estudos.

Aos meus sogros, Maria Zuleide e José Patrício.

À minha professora e amiga Eunice Maia de Andrade.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, pelo dom da vida, fidelidade e amor.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), por intermédio do Departamento de Engenharia, pela oportunidade e ensinamentos ao longo do Mestrado, possibilitando a realização desta dissertação.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e ao Professor Gilberto Sedyama, pela concessão dos dados climáticos para a realização do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Luiz Gonsaga de Carvalho, pelas idéias iniciais, incentivo, dedicação, disponibilidade, paciência, confiança depositada, amizade e, acima de tudo, pela orientação segura e correta durante a realização deste trabalho.

Aos Professores Adão Wagner Pêgo Evangelista e Antônio Augusto Aguiar Dantas, pelas contribuições e sugestões apresentadas.

Ao Professor Luis Marcelo Tavares de Carvalho, pelo auxílio em SIG e por ter possibilitado o uso do Laboratório de Estudos em Manejo Florestal.

Aos professores e servidores técnico-administrativos do Departamento de Engenharia, pela convivência e amizade.

Aos colegas de pós-graduação, pelo convívio e motivação nas disciplinas superadas.

A todos os meus amigos que souberam me dar forças nas horas de desânimo.

À minha família, pelo insubstituível carinho, amor e apoio em todos os momentos difíceis.

A todos que contribuíram, diretamente ou indiretamente, para a realização desta dissertação de mestrado, o meu MUITO OBRIGADO!!!

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Evapotranspiração	4
2.2 Evapotranspiração de referência.....	5
2.3 Fatores que afetam a evapotranspiração.....	6
2.3.1 Radiação solar	7
2.3.2 Vento	8
2.3.3 Umidade relativa do ar	8
2.4 Sistemas de Informações Geográficas e distribuição espacial da evapotranspiração	9
2.5 Situação da irrigação do estado de Minas Gerais.....	13
3 METODOLOGIA	15
3.1 Caracterização geográfica e climática da região de estudo	15
3.2 Estações climatológicas selecionadas.....	16
3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência	20
3.3.1 Declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água	21
3.3.2 Temperatura do ar	21
3.3.3 Pressão de saturação do vapor d'água	22
3.3.4 Coeficiente psicrométrico.....	22
3.3.5 Calor latente de evaporação	22
3.3.6 Coeficiente psicrométrico modificado	23
3.3.7 Velocidade do vento a 2 m de altura	23
3.3.8 Pressão parcial de vapor d'água.....	24
3.3.9 Umidade relativa do ar	24

3.3.10 Radiação solar na ausência ou “topo” da atmosfera.....	25
3.3.11 Distância relativa Terra-sol	25
3.3.12 Ângulo horário do nascer ou pôr do sol	26
3.3.13 Declinação solar	26
3.3.14 Saldo de radiação de ondas curtas	26
3.3.15 Radiação solar incidente na superfície da Terra.....	26
3.3.16 Duração astronômica do dia.....	27
3.3.17 Saldo de radiação de ondas longas	27
3.3.18 Temperatura absoluta máxima do ar	27
3.3.19 Temperatura absoluta mínima do ar.....	27
3.3.20 Saldo de radiação.....	27
3.3.21 Fluxo de calor no solo	28
3.4 Preparação dos dados para uso no SIG.....	28
3.5 Interpolação dos dados e geração dos mapas	29
3.6 Espacialização das variáveis estudadas.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Variação sazonal e espacial do total anual médio da evapotranspiração de referência e média da precipitação pluvial total anual	33
4.2 Análise das variações espaciais da evapotranspiração de referência diária média anual, da radiação solar incidente na superfície, umidade relativa do ar e velocidade do vento	45
4.3 Distribuição temporal e espacial da evapotranspiração de referência diária média mensal	52
4.4 Distribuição espacial da radiação solar incidente na superfície, umidade relativa do ar e velocidade do vento nos meses com valores extremos	62
5 CONCLUSÕES.....	70
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

RESUMO

LEMOS FILHO, Luis César de Aquino. **Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para o estado de Minas Gerais.** 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

O conhecimento de informações que expressam a demanda hídrica das plantas é fundamental para a irrigação. O objetivo principal desta pesquisa foi analisar a demanda hídrica em Minas Gerais, representada pela evapotranspiração de referência (ET_0), durante o ano, gerando informações que possam subsidiar a agricultura irrigada do estado. Os valores de ET_0 foram estimados pelo método de Penman-Monteith, padronizado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), a partir de dados diários originados de registros de 42 estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) referentes a um período de 17 anos (1961 a 1978). No geral, os resultados mostraram que a evapotranspiração de referência é bastante variável em Minas Gerais, chegando a apresentar valores médios de 914 mm ano^{-1} até valores de $1.977 \text{ mm ano}^{-1}$. As maiores variações, tanto espaciais como temporais, são registradas no norte do estado, onde também ocorrem os maiores valores de ET_0 , mostrando ser uma região com maior necessidade do uso da irrigação e apropriada ao cultivo de culturas adaptadas ao estresse hídrico. O estado de Minas Gerais apresenta um déficit hídrico anual em aproximadamente 50% de sua área total, podendo chegar, em regiões do extremo norte a $1.165 \text{ mm ano}^{-1}$. A radiação solar incidente na superfície terrestre (R_s) é o elemento climático que mais influencia a estimativa da ET_0 quando comparado à umidade relativa do ar (UR) e à velocidade do vento. Os meses que apresentaram as maiores e menores demandas hídricas no Estado foram janeiro e junho, respectivamente, indicando a necessidade de um manejo de irrigação adequado nessas épocas para se evitar a falta ou o desperdício de água na irrigação. Em função da nítida distinção que apresentaram os dados de ET_0 geoespacializados nas mesorregiões do estado de Minas Gerais, o conhecimento do correto valor da ET_0 em cada localidade trará benefícios aos produtores no manejo da irrigação.

* Comitê Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho – UFLA (Orientador), Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista – UFLA e Prof. Dr. Antônio Augusto Aguilar Dantas – UFLA.

ABSTRACT

LEMOS FILHO, Luis César de Aquino. **Spatial-time analysis of reference evapotranspiration in the Minas Gerais State, Brazil.** 2005. 81p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering in the Irrigation and Drainage) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brazil.*

The knowledge of information that express the water requirement of the plants is a fundamental issue for the irrigation process. The main objective of this research was to analyze the water requirement in Minas Gerais State, Brazil, represented by the evapotranspiration reference (ET_0), during the year, generating information that can subsidize the irrigated agriculture in the State. The ET_0 values were estimated through the Penman-Monteith method, standardized by the Food and Agriculture Organization (FAO), starting from daily data originated by registrations of 42 climatological stations of the *Instituto Nacional de Meteorologia* (INMET) referring to a period of 17 years (1961 to 1978). In general, the results showed that the evapotranspiration reference is plenty variable in Minas Gerais, reaching medium values from 914 mm year⁻¹ to 1977 mm year⁻¹. The largest variations, as much spatial even concerning time, are registered in the north part of the State, where happen the largest values of ET_0 , showing to be an area with larger needs for irrigation and appropriate to the cultivation of crops with water stress adaptation. The Minas Gerais State presents a annual water deficit in approximately 50% of the total area, and can reach at the extreme north the value of 1165 mm.year⁻¹. The solar radiation incidence in the terrestrial surface (R_s) is the most important climatic element which caused the biggest influence on ET_0 estimated when compared to the air relative humidity (UR), and also with the wind speed. The months that presented the largest and smallest water requirements in the State were January and June, respectively, indicating the need of an appropriate irrigation handling in these periods in order to avoid the deficit or the excess of water irrigation. According to the clear distinction that presented the data of mapping ET_0 in the different regions in the Minas Gerais State, it became obviously that the knowledge of the correct ET_0 values in each locality will bring much benefits to farm-producers in the irrigation scheduling.

* Guidance Committee: Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho - UFLA (Adviser), Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista - UFLA and Prof. Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

O fato da água ser um recurso natural cada vez mais escasso e a sua demanda ser cada vez maior devido ao rápido crescimento da população mundial, está tornando-a um dos mais importantes bens patrimoniais. Os recursos hídricos têm, entre os recursos econômicos, uma importância tão grande que, de alguns anos atrás aos dias atuais, passaram a ser tema de preocupação de profissionais e governos. O planejamento adequado e a administração cuidadosa desses recursos são essenciais para se obter a eficiência que será indispensável no futuro, no que se relaciona à utilização da água.

Dentre os diversos usos dos recursos hídricos, a irrigação se destaca pela sua importância sócio-econômica, seja em regiões áridas ou semi-áridas, onde esta prática é imprescindível para uma boa produção, seja em regiões onde ela é praticada de forma a complementar a precipitação pluvial no atendimento das necessidades hídricas das culturas.

Para uma melhor caracterização e entendimento dos aspectos básicos de funcionamento da hidrografia de uma região e, conseqüentemente, um gerenciamento mais eficiente de seus recursos hídricos, o entendimento de elementos climáticos, como a evapotranspiração, torna-se indispensável, principalmente no que diz respeito às suas variações no tempo e no espaço.

As metodologias normalmente utilizadas e recomendadas para se estimar o requerimento de água pelas plantas são baseadas em elementos climáticos. Por isso, a obtenção de informação meteorológica regional confiável é de suma importância, pois acarretará em estimativas mais precisas da evapotranspiração e, conseqüentemente, num melhor aproveitamento da água disponibilizada para irrigação em uma determinada região.

O conhecimento da quantidade de água necessária para o bom desenvolvimento de uma cultura é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação.

Devido à falta de informações climatológicas espacializadas, normalmente, projetistas baseiam-se no conceito de que o valor medido na estação meteorológica representa uma área homogênea em torno dela, o que não é verdade, principalmente em áreas com grandes variações climáticas e topográficas. Essa aproximação introduz erros na estimativa da demanda de irrigação em escala regional. Por isso, é importante, para o planejamento de sistemas de produção agrícola, o conhecimento do comportamento dos elementos climáticos de cada localidade, para subsidiar projetistas na tarefa de otimização do aproveitamento dos recursos naturais e de obtenção da máxima produção ao menor custo possível.

O uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na agrometeorologia visa solucionar a ausência de informações regionalizadas. Neste caso, sua principal aplicação é transformar dados numéricos, obtidos em pontos referenciados geograficamente na superfície, em mapas interpolados a partir das informações originais. Assim, podem-se ter valores estimados para todas as localidades da região representada, não se restringindo apenas aos dados observados inicialmente. Com isso, gera-se uma série de informações confiáveis a respeito da variação espacial dos elementos climáticos, sem a necessidade de observação direta. Além disso, na maioria das vezes, a disseminação das informações utilizando-se de mapas é mais eficiente para se atingir os usuários finais, que necessitam aplicá-las, por exemplo, em suas atividades agrícolas.

Tendo em vista o que foi exposto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de gerar informações que possam servir como subsídios à agricultura irrigada do estado de Minas Gerais. Portanto, foi feito um estudo, para todo este estado, da variação espacial e temporal da evapotranspiração de referência

estimada pelo método de Penman-Monteith, padronizado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), e dos principais elementos climáticos que agem diretamente na evapotranspiração, ou seja, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Evapotranspiração

Há uma demanda crescente por alimentos no mundo, havendo, assim, a necessidade da agricultura ser cada vez mais produtiva e eficiente. Isso tem levado ao aumento crescente na adoção da técnica de irrigação, fazendo com que a necessidade de informações nessa área de conhecimento agrônômico aumentasse rapidamente nas últimas décadas, especialmente em relação às informações agroclimáticas.

Dada a escassez dos recursos hídricos, o uso da água em áreas irrigadas deve ser o mais racional possível, visto que a irrigação consiste em fornecer água às plantas para que elas evapotranspirem em sua taxa potencial. Assim, determinar o consumo da água das culturas passa a ser um requisito fundamental para o sucesso da irrigação. Alguns trabalhos (Fuchs et al., 1987; Jensen & Wright, 1978; Mohammad & Al-Amoud, 1993) têm mostrado a importância e a necessidade de se estimar corretamente a evapotranspiração das culturas, visando o manejo racional da irrigação e a otimização da eficiência do uso da água, principalmente onde o recurso hídrico é pouco disponível, como é o caso de regiões de clima árido e semi-árido.

A evapotranspiração refere-se ao total de perda de água para a atmosfera da superfície do solo e das plantas, pela combinação simultânea da evaporação com a transpiração (Sedyama, 1996). Pereira et al. (1997) definem a evapotranspiração como um elemento climatológico fundamental, que corresponde ao processo oposto da chuva, também expressa em milímetros.

Segundo Doorenbos & Pruitt (1977), para se estimar a evapotranspiração de uma cultura, geralmente é necessário determinar a evapotranspiração de

referência (ET_0), ajustando-a, posteriormente, às condições específicas das culturas e sua fase de desenvolvimento.

2.2 Evapotranspiração de referência (ET_0)

O conceito de evapotranspiração potencial (ET_p) foi introduzido por Thornthwaite (1948) e aperfeiçoado por Penman (1956). Nas condições adotadas por Thornthwaite (1948) para definição de ET_p , a perda de água do sistema solo-planta para a atmosfera (evapotranspiração) ocorre como função única e exclusiva do balanço vertical de energia, ou seja, das condições atmosféricas sobre a vegetação sem interferências advectivas, podendo ser estimada por modelos matemáticos teóricos ou empíricos, desenvolvidos e testados para várias condições climáticas.

Em maio de 1990, a *Food and Agriculture Organization* (FAO) promoveu em Roma, Itália, um encontro de pesquisadores, especialistas na área de evapotranspiração, para atender a vários objetivos. Dentre eles, o de analisar os conceitos e procedimentos de metodologia de cálculos de evapotranspiração, com o enfoque ao estabelecimento de uma nova definição para a cultura de referência e o método para que se pudesse estimar a evapotranspiração para essa referência. Assim, o novo conceito proposto para a evapotranspiração potencial (ET_p) passou a ser denominado evapotranspiração de referência (ET_0), tornando-se, desde então, um conceito largamente utilizado. Neste caso, a cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, cujas características se assemelham, bem de perto, à evapotranspiração da grama. O conceito de ET_0 foi, então, redefinido como sendo a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética com altura uniforme entre 8 a 15 cm, resistência aerodinâmica de 69 s m^{-1} , albedo de 0,23, em fase de crescimento ativo e sem restrições de água no solo, a qual esteja cobrindo completamente uma superfície extensa de solo

(Allen et al, 1994; Assis, 1995; Sedyama, 1996). Também em 1990, após os especialistas em evapotranspiração revisarem as metodologias recomendadas pela FAO, chegou-se à conclusão de que o método de Penman-Monteith, ao ser parametrizado para cultura hipotética, apresentava os melhores resultados em estudos comparativos, realizados em diversas condições de clima, passando, então, a ser recomendado pela FAO como método padrão para estimativa da ET_0 (Dantas Neto, 1999).

Jensen et al. (1990), após terem feito avaliações dos métodos de estimativas da ET_0 de acordo com o clima, em áreas de clima árido e úmido de várias localidades, observaram que o método de Penman-Monteith-FAO foi o que melhor se ajustou aos dados medidos em lisímetro de pesagem. Vários outros trabalhos vêm mostrando que o desempenho desse método é satisfatório, quando comparado a medidas em lisímetros, como os de Allen (1986), Allen et al. (1989), Allen et al. (1994), Camargo & Sentelhas (1997), Hussein (1999), Maggiotto (1996), Ribeiro (1996) e Sentelhas (1998).

2.3 Fatores que afetam a evapotranspiração

Os fatores que afetam as taxas de evapotranspiração dos cultivos podem ser enquadrados em três categorias: fatores climáticos, da planta e do solo (Sedyama, 1996). De acordo com Medeiros (2002), os principais fatores que afetam a evapotranspiração são os elementos climáticos e os fatores inerentes à cultura. Em relação aos elementos climáticos, podem ser citados a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a radiação solar, o vento, a chuva e a pressão de vapor d'água, como sendo os principais elementos que afetam o valor da evapotranspiração. Já em relação à cultura, podem-se citar fatores como área foliar, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar, resistência do dossel à

difusão do vapor d'água e outros que geralmente estão associados a um valor de coeficiente de cultura (K_c).

Para Doorenbos & Pruitt (1977), os elementos climatológicos agem nas plantas de forma conjunta, sendo difícil determinar o grau de importância entre eles. De forma geral, para uma região, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e vento, e quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser a taxa de evapotranspiração (Evangelista, 1999).

2.3.1 Radiação solar

Segundo Pereira et al. (1997), a evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água para as plantas no solo. A demanda atmosférica por água é afetada de forma direta pela radiação solar, pois ela é a fonte de energia para todos os processos que ocorrem na atmosfera.

Chang (1971) afirma que a radiação solar é, sem dúvida, o elemento climático mais importante na estimativa da taxa de evapotranspiração. O mesmo autor define que a importância relativa da radiação líquida sobre a evapotranspiração é de 80%, da umidade relativa do ar é de 6% e da velocidade do vento é de 4%, aproximadamente.

Amatya et al. (1992) relatam, em estudo realizado na Carolina do Norte (EUA), que a radiação foi o elemento climático mais importante no processo de evapotranspiração e que este depende do local (latitude), da topografia da região (altitude) e da época do ano.

Quando se estuda o efeito da radiação solar na evapotranspiração, é preciso estar atento ao fato de que nem toda energia disponível que chega na Terra será usada para a evaporação da água. Parte dessa energia será usada para aquecer a atmosfera e o solo. No caso de não se dispor de dados de radiação

solar incidente (R_s) medidos, pode-se lançar mão de estimativas a partir de dados de insolação (n), da duração astronômica do dia (N) e da radiação no topo da atmosfera (R_a).

2.3.2 Vento

O movimento do ar, ou seja, o vento, levando o ar úmido que envolve uma área e substituindo-o por um ar seco, promove a perda de água pelas plantas e superfícies. Entretanto, sua influência vai até um valor crítico, quando outras variáveis podem atuar de forma mais intensa. Se comparado à radiação solar, o vento tem influência secundária, porém, em determinadas condições de umidade do ar, sua interferência tende a aumentar, à medida que a temperatura decresce (Klar, 1984).

Quando o vento quente e seco sopra sobre uma pequena área úmida, ocorre o processo de advecção. Em locais onde ocorrem advecções fortes, sejam locais ou regionais, observadas geralmente em áreas úmidas que são circundadas por áreas secas, a importância relativa da radiação decresce frente à advecção. Então, a transferência de calor sensível das áreas secas circunvizinhas passa a contribuir significativamente no processo de evapotranspiração, aumentando, dessa forma, a importância da velocidade do vento e da umidade no processo evapotranspirativo. Segundo Hargreaves (1994), quando os ventos interagem com temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor d'água, entre outros, influenciam na advecção.

2.3.3 Umidade relativa do ar

A umidade do ar depende da temperatura, que age indiretamente. A taxa de evapotranspiração está diretamente ligada ao déficit de vapor d'água.

Normalmente à medida que a temperatura do ar decresce, ocorre um aumento na umidade relativa e queda na evapotranspiração (Medeiros, 2002).

Em climas úmidos de regiões tropicais, apesar da elevada quantidade de energia, a alta umidade relativa reduz a evapotranspiração, pois o ar está sempre próximo da saturação. A umidade relativa local e a temperatura determinam o déficit de pressão de vapor. A diferença entre a pressão de saturação do vapor d'água e a atual pressão do vapor d'água define o déficit de pressão, isto é, o quanto de vapor é necessário para saturar determinado volume de ar. Isto é um indicador da capacidade evaporativa do ar.

Também devem ser considerados outros fatores que afetam a evapotranspiração, como: 1- poder refletor da superfície (albedo), em que superfícies mais claras refletem mais, portanto, possuem menos energia disponível e 2- poder evaporativo do ar, que determina a demanda atmosférica por água e está relacionado à velocidade do vento e ao déficit de pressão de vapor d'água. Quanto maior o valor do poder evaporativo do ar, maior será a evaporação (Medeiros, 2002).

2.4 Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e distribuição espacial da evapotranspiração

Há alguns anos, toda informação espacial era armazenada e apresentada ao usuário já classificada na forma de mapas temáticos, ao passo que dados seriais (como dados climáticos, por exemplo) só podiam ser armazenados e apresentados como listas e gráficos.

Atualmente, o emprego do computador é fundamental para auxiliar o manuseio da informação. A utilização de técnicas modernas de tratamento e armazenamento de dados, que permitem a centralização da informação e sua integração, é uma poderosa ferramenta que não pode mais ser desprezada por

profissionais que usam as informações geográficas, como é o caso de informações climatológicas.

A demanda da capacidade de rápido processamento que os computadores podem proporcionar, tendo em vista os grandes volumes de observação na natureza, é, em parte, responsável pelo desenvolvimento tecnológico dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Veiga et al., 2001). Por meio do uso desta nova tecnologia, dados espaciais podem ser transformados, combinados e apresentados no formato requerido pelo usuário, de acordo com suas necessidades. Nestes sistemas, conjuntos de dados extremamente complexos e grandes podem ser armazenados de modo compacto e acessados rapidamente com precisão mecânica (Veiga et al., 2001).

Um sistema de informação pode ser definido como um conjunto de operações que permite a observação, o armazenamento, a manipulação e a análise de dados, originando informações secundárias que auxiliarão o usuário no processo de tomada de decisão. Quando estes dados estão referenciados por coordenadas espaciais ou geográficas, o sistema é denominado Sistema de Informações Geográficas (SIG). O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informações são as funções que realizam as análises espaciais.

Logo, um SIG pode ser definido como uma coleção organizada de equipamentos de computação (hardware), programas aplicativos (software) e dados referenciados espacialmente, projetados para capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar e apresentar visualmente todas as formas de informações georreferenciadas para um objetivo ou aplicação específica (Burrough, 1986; Calijuri & Rohm, 1994; Parent, 1988).

O SIG é uma ferramenta eficaz para estudos de quaisquer tipos de fenômenos que apresentem dados georreferenciados e, dentre suas várias formas de obtenção dos resultados desejáveis, os mesmos podem ser visualizados por meio de mapas. O mapa é a representação, em escala e em um meio plano, de

uma seleção de feições reais ou abstratas, localizadas ou relacionadas à superfície terrestre. Ou seja, o mapa é, na verdade, um modelo da realidade.

Segundo Pellegrino et al. (1998), uma das aplicações principais de um SIG em agrometeorologia é a de transformar dados numéricos, obtidos em pontos referenciados geograficamente na superfície, em mapas interpolados a partir das informações originais, obtendo-se valores estimados para todas as localidades da região representada, não se restringindo apenas aos dados observados inicialmente. Com isso, gera-se uma série de informações confiáveis a respeito do comportamento espacial da variável, sem a necessidade de observação direta.

Na elaboração de projetos ligados ao uso de recursos hídricos para a agricultura, geralmente, o projetista utiliza informações climatológicas de estações situadas em locais distantes da área de locação do projeto, o que acaba acarretando em erros na estimativa da real demanda hídrica das plantas.

Ian & Wein (1998), citados por Amorim et al. (2003), afirmam que o uso de dados de estações climatológicas próximas pode ser realizado adotando-se dois procedimentos distintos: ou supõe-se que os dados climáticos de uma dada estação sejam representativos de uma região circunvizinha a qual engloba um determinado local específico, ou, então, se faz a interpolação espacial dos elementos climáticos para gerar dados para um local específico ou para uma série de locais. A interpolação para se obter os valores médios de elementos climáticos pode ser obtida por diversos métodos que se baseiam em relações entre as áreas de influência e a distância entre postos de coleta de dados.

Pellegrino (1995) e Wei & Mcguinness (1973), citados por Pellegrino et al. (1998), obtiveram melhores resultados com o método do inverso do quadrado da distância para elementos meteorológicos, quando comparado a outros métodos clássicos como o de Thiessen e o da média aritmética, tomando-se como padrão o método das isoietas. Amorim et al. (2003), comparando

diferentes métodos de interpolação para dados climáticos, obtiveram melhor desempenho do método inverso do quadrado da distância (MIQD) para dados de temperatura mínima, evaporação e insolação. Estes mesmos autores afirmam que o MIQD é um dos métodos mais comumente aplicados para a estimativa de dados climáticos e é a técnica de interpolação mais simples.

Segundo Saad & Scaloppi (1988), a grande variabilidade dos valores assumidos pelos elementos meteorológicos acarreta considerável dispersão dos valores calculados da evapotranspiração das culturas. Com o intuito de quantificar as variações espaciais na demanda hídrica das culturas, Hashmi et al. (1995) modelaram espacialmente, com uso das técnicas de interpolação disponíveis em um SIG, a variabilidade dos parâmetros usados para estimar a evapotranspiração regional da bacia do “Cache la Poudre”, no Colorado, Estados Unidos, a partir de mapas climáticos pontuais e de uso do solo. Nesse trabalho, os autores concluíram que a versatilidade do sistema, ao considerar as variabilidades espacial e temporal dos valores dos elementos climáticos usados no cálculo da evapotranspiração, proporciona aos pesquisadores uma poderosa ferramenta para análise espacial. Comentaram, ainda, que a técnica permite abranger, com muita agilidade e precisão, grandes regiões; além disso, proporciona uma análise, de maneira mais confiável, das interações entre os parâmetros de interesse.

Vários autores (Garcia et al., 1992; Human et al., 1993; La Barbera et al., 1993; Lal et al., 1993; Matthews et al., 1994; Moore et al., 1993) empregaram técnicas de SIG como ferramenta de análise espacial em projetos sujeitos às influências edafoclimatológicas. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Beltrame et al. (1994), que estimaram, para o estado do Rio Grande do Sul, as isolinhas de evapotranspiração de referência calculadas pela equação de Penman-Monteith-FAO, utilizando 34 estações meteorológicas distribuídas em todo o estado. A interpolação dos dados foi feita usando o método Kriging,

cujos resultados, apresentados em decêndio, geraram um total de 36 mapas de isolinhas.

Barbosa et al. (2005) espacializou, com o uso de SIG, a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO e a precipitação efetiva para a estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe no estado do Ceará. Os autores concluíram que a metodologia empregada possibilitou a obtenção de valores estimados individualizados por município, possibilitando uma estimativa mais precisa da demanda por água em cada localidade.

Perdigão & Moita (2003) afirmaram que a utilização de técnicas de espacialização em meteorologia e climatologia encontra-se bastante divulgada, possibilitando a utilização de tais métodos em combinação com técnicas de SIG. Chung et al. (1997) aplicaram SIG para o cálculo da distribuição espacial da ET_0 em uma bacia hidrográfica na Coréia, por meio da interpolação espacial dos dados de 28 estações climáticas.

Li et al. (2005) desenvolveram um aplicativo (ArcET) no ambiente ESRI, ArcGis e ArcObjects, para a interpolação de dados climáticos e cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0), podendo, ainda, ser combinado com os coeficientes culturais da cobertura vegetal do terreno, constituindo-se numa eficaz ferramenta para a estimativa da distribuição espacial e temporal da evapotranspiração.

2.5 Situação da irrigação do estado de Minas Gerais

De acordo com o IBGE (2001), o total da área irrigada em uso no Brasil, em 2001, era de 3,159 milhões de hectares e Minas Gerais respondia por aproximadamente 10% desse valor (314 mil hectares), representando apenas 13% do total de áreas identificadas como aptas para irrigação no estado. Apesar

da área irrigada de Minas Gerais ter crescido aproximadamente 3% ao ano entre 1996 e 2001, este valor foi inferior às taxas apresentadas por outros estados e ficou muito aquém da potencialidade mineira.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização geográfica e climática da região de estudo

Situado na região sudeste do Brasil, o estado de Minas Gerais localiza-se entre os paralelos 14°13'57" e 22°55'22" de latitude Sul e os meridianos de 39°51'23" e 51°02'45" de longitude oeste. O estado caracteriza-se por apresentar topografia irregular. A altitude média é de aproximadamente 700 m, mas 9% das suas terras apresentam altitudes superiores a 1.000 m, com montanhas entre 1.500 a 2.900 m. Sua posição, vegetação e topografia oferecem condições climáticas diversificadas e excelente potencial hídrico.

As temperaturas médias do ar situam-se entre 18°C e 25°C, com médias mínimas de 9°C, na região Sul do Estado, e médias máximas de 33°C, na região Norte. A precipitação pluvial varia entre 800 mm, no extremo norte e 1.700 mm, no sudeste do estado. Segundo a classificação de Köppen, em Minas Gerais podem ser encontrados os seguintes tipos climáticos: Aw, BSw, Cwa e Cwb, significando que podem ser encontradas desde regiões com clima semi-árido até regiões com clima tropical chuvoso com inverno seco. As formas predominantes de cobertura vegetal são floresta úmida costeira, floresta seca, florestas subtropicais mista, cerrados e campo (Anuário..., 1990).

Sua extensão territorial corresponde a cerca de 586.852,25 km², equivalendo a 7% da área total do Brasil. Nesta área, encontram-se distribuídos 853 municípios e 12 mesorregiões (Figura 1), que se caracterizam por aspectos sociais e econômicos distintos, ocupando áreas territoriais com tamanhos e recursos naturais também diversificados. O setor agropecuário participa com um bom percentual do Produto Interno Bruto (PIB) mineiro (Faria, 1998).

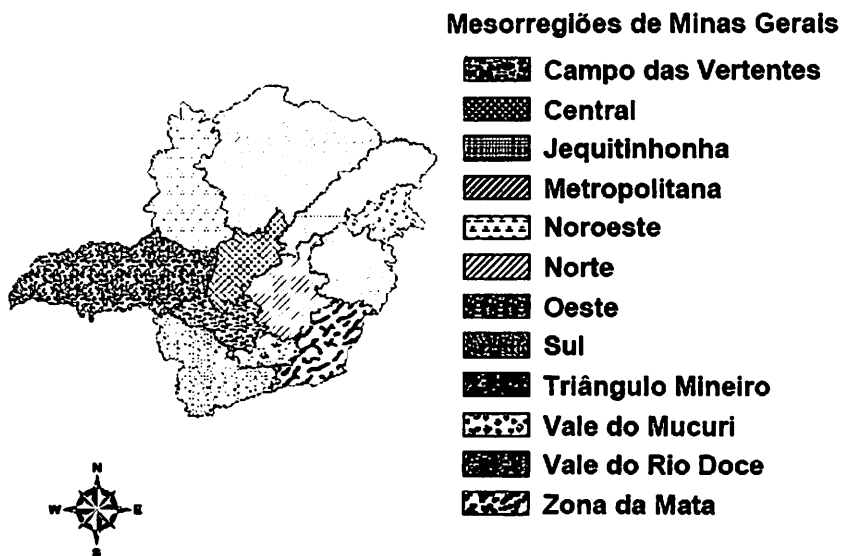


FIGURA 1 - Mesorregiões geográficas no estado de Minas Gerais.

3.2 Estações climatológicas selecionadas

O banco de dados que foi utilizado no estudo originou-se de registros de estações classificadas como estações climatológicas principais (ECP) pertencentes à rede nacional de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). São dados diários, referentes a um período de 17 anos, que vai de 1961 a 1978. As estações selecionadas para o estudo foram aquelas que apresentaram séries históricas mínimas de 5 anos para todos os dados necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith-FAO descrito por Allen et al. (1998) e Pereira et al. (1997). Para as estações que apresentaram falhas ao longo de suas séries históricas, foi feito o preenchimento das mesmas pelo método da regressão linear simples.

Foram utilizadas no trabalho 42 estações climatológicas (Figura 2), das quais, apenas 30 estão localizadas dentro do estado de Minas Gerais. Para que pudesse ser feita a espacialização das informações, por meio do SIG utilizado no trabalho, foram usados dados de estações climatológicas que se encontram distribuídas nas regiões ou estados circunvizinhos a Minas Gerais. Entre eles estão: Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia, totalizando 12 estações fora do limite estadual de Minas Gerais. Observa-se, ainda, na Figura 2, que as regiões Sul, Sudeste, Leste e Central do estado foram as localidades que apresentaram uma maior concentração de estações climatológicas e, por outro lado, as regiões Norte e do Triângulo Mineiro foram as áreas que detinham as menores concentrações destas estações.

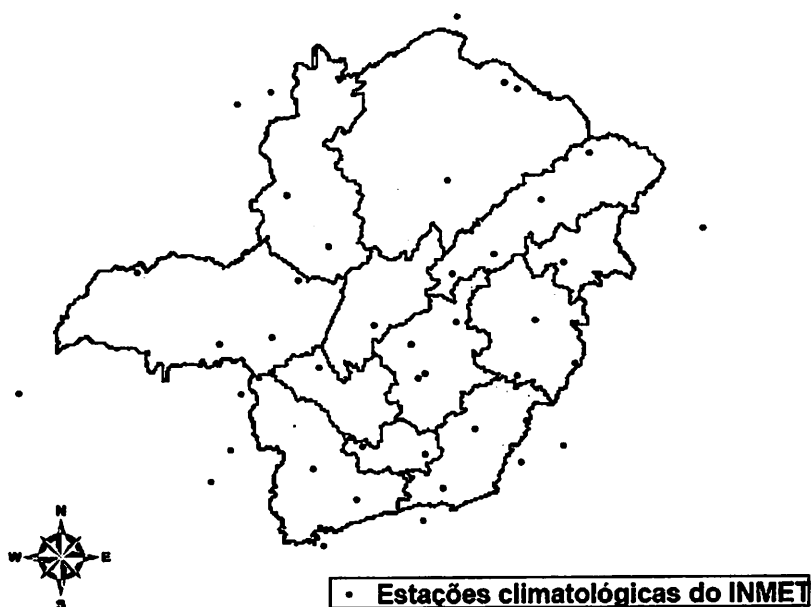


FIGURA 2 - Localização das estações climatológicas principais do INMET no estado de Minas Gerais.

No Quadro 1 estão descritas as localizações das diversas estações climatológicas que foram usadas com suas respectivas coordenadas geográficas, conforme INMET (2005).

QUADRO 1. Estações climatológicas principais do INMET em Minas Gerais e estados circunvizinhos

Estação (código)	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
83338	Espinosa, MG	14°55''	42°51''	571,22
83388	Monte Azul, MG	15°05'	42°45'	604,73
83393	Pedra Azul, MG	16°00'	41°17'	649,91
83437	Montes Claros, MG	16°43'	43°52'	647,18
83442	Araçuaí, MG	16°52'	42°04'	285,38
83479	Paracatu, MG	17°13'	46°52'	712,30
83481	João Pinheiro, MG	17°42'	46°10'	761,36
83488	Itamarandiba, MG	17°51'	42°51'	1.097,80
83492	Teófilo Otoni, MG	17°51'	41°31'	357,38
83514	Capinópolis, MG	18°41'	49°34'	621,54
83531	Patos de Minas, MG	18°36'	46°31'	944,16
83538	Diamantina, MG	18°15'	43°36'	1.296,92
83543	Gov. Valadares, MG	18°51'	41°56'	278,45
83570	Pompeu, MG	19°13'	45°00'	691,71
83577	Uberaba, MG	19°45'	47°55'	743,90
83579	Araxá, MG	19°34'	46°56'	1.004,67
83582	Bambuí, MG	20°00'	45°59'	662,27
83586	Sete Lagoas, MG	19°28'	44°15'	735,95
83587	B. Horizonte, MG	19°56'	43°56'	852,28

“...Continua...”

“QUADRO 1, cont.”

Estação (código)	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
83589	C. Mato Dentro, MG	19°02’	43°26’	652,80
83592	Caratinga, MG	19°48’	42°09’	611,21
83595	Aimorés, MG	19°29’	41°04’	83,74
83632	Ibirité, MG	20°01’	44°03’	815,54
83639	Caparão, MG	20°31’	41°52’	844,18
83642	Viçosa, MG	20°45’	42°51’	692,93
83683	Machado, MG	21°40’	45°55’	877,35
83687	Lavras, MG	21°14’	45°00’	920,00
83689	Barbacena, MG	21°15’	43°46’	1.127,00
83692	Juiz de Fora, MG	21°46’	43°21’	941,17
83736	São Lourenço, MG	22°06’	45°01’	901,32
83377	Brasília, DF	15°47’	47°56’	1.161,12
83379	Formosa, GO	15°32’	47°20’	912,80
83408	Carinhanha, BA	14°10’	43°55’	440,23
83446	Guaratinga, BA	16°44’	39°44’	324,86
83618	Três Lagoas, MS	20°47’	51°42’	313,90
83630	Franca, SP	20°33’	47°26’	1.027,00
83669	São Simão, SP	21°29’	47°33’	618,20
83714	Campos do Jordão, SP	22°44’	45°35’	1.579,61
83726	São Carlos, SP	22°01’	47°53’	856,80
83646	C. Itapemirim, ES	20°51’	41°06’	78,59
83695	Itaperuna, RJ	21°12’	41°53’	619,82
83742	Vassouras, RJ	22°20’	43°40’	438,06

3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)

A evapotranspiração de referência (ET₀) foi estimada a partir de dados diários de temperaturas máximas, mínimas e médias do ar, pressão atmosférica, insolação, umidade relativa do ar e vento. Na estimativa da ET₀, foi utilizado o método de Penman-Monteith considerado pela FAO como o método padrão para estimativa da ET₀.

Segundo as parametrizações propostas pela FAO, compiladas no boletim FAO-56 (Allen et al., 1998), tem-se então o modelo definido para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) na escala diária em mm d⁻¹, sendo, portanto, este método nomeado como Penman-Monteith-FAO, conforme a equação 1:

$$ET_0 = \frac{s}{s + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{(s + \gamma^*)} \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a) \dots\dots\dots (1)$$

em que,

- ET₀ - evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);
- γ - coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹);
- s - declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C⁻¹);
- γ* - coeficiente psicrométrico modificado (kPa °C⁻¹);
- R_n - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m⁻² d⁻¹);
- G - fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹);
- λ - calor latente de evaporação (MJ kg⁻¹);
- T - temperatura média do ar (°C);
- U₂ - velocidade do vento à altura de 2 m (m s⁻¹);
- e_s - pressão de saturação do vapor d'água (kPa);
- e_a - pressão parcial do vapor d'água (kPa).

As equações utilizadas para a estimativa dos parâmetros da equação de Penman-Monteith-FAO são descritas a seguir, de acordo com Allen et al. (1998) e Pereira et al. (1997):

3.3.1 Declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (s)

$$s = \frac{4098 \text{ es}}{(T + 237,3)^2} \dots\dots\dots (2)$$

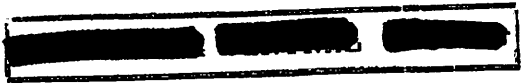
3.3.2 Temperatura do ar (T)

Allen et al. (1998) propõem a estimativa da temperatura média pela média entre a temperatura máxima (T_x) e temperatura mínima (T_n), assim como para a obtenção da pressão parcial de vapor d'água (e_a) a partir de umidade relativa do ar máxima ($UR_{m\acute{a}x}$) e umidade relativa do ar mínima ($UR_{m\acute{i}n}$). Como as estações climatológicas utilizadas não têm $UR_{m\acute{a}x}$ e $UR_{m\acute{i}n}$, a e_a surge da umidade relativa do ar média ($UR_{m\acute{e}d}$), conforme a equação utilizada pelo INMET (Equação 11). Portanto, a temperatura média também será dada pela equação (Equação 3) proposta pelo INMET, conforme descreveram Pereira et al. (1997).

$$T = \frac{T_{12} + T_x + T_n + 2T_{24}}{5} \dots\dots\dots (3)$$

em que,

T_{12} e T_{24} , são, respectivamente, as temperaturas às 12:00 e 24:00 TMG (tempo médio de Greenwich), seguindo o padrão mundial de leitura estabelecido para as estações climatológicas que, de acordo com o fuso



horário para o estado de Minas Gerais, equivale, respectivamente, às 9:00 e 21:00 horas;

T_x e T_n correspondem às temperaturas (°C) máxima e mínima, respectivamente.

3.3.3 Pressão de saturação do vapor d'água (e_s)

- Essa determinação foi feita pela Equação de Tetens:

$$e_s = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T}{(237,3+T)} \right) \dots\dots\dots (4)$$

3.3.4 Coeficiente psicrométrico (γ)

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \dots\dots\dots (5)$$

em que,

P - pressão atmosférica média diária (kPa).

A pressão atmosférica foi obtida das normais climatológicas (Brasil, 1992), referentes ao período de 1961 a 1990, para cada estação.

3.3.5 Calor latente de evaporação (λ)

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3}) T \dots\dots\dots (6)$$

3.3.8 Pressão parcial de vapor d'água (ea)

Assim como justificado para temperatura média, a pressão parcial de vapor d'água (ea), conforme Allen et al. (1998), deve ser calculada com base no conhecimento da umidade relativa do ar máxima (UR_{máx}) e umidade relativa do ar mínima (UR_{mín}):

$$ea = \frac{es_{(T_n)}UR_{máx} + es_{(T_x)}UR_{mín}}{200}$$

Contudo, por não se ter os registros de UR_{máx} e UR_{mín}, seguiu-se o cálculo de umidade relativa média (UR) proposta pelo INMET (Equação 11) e descrita por Pereira et al. (1997). A partir desta, a estimativa de ea é feita pela equação 10.

$$ea = \frac{es \times UR}{100} \dots\dots\dots (10)$$

em que,

ea - pressão parcial de vapor da água (kPa);

UR - umidade relativa do ar (%).

3.3.9 Umidade relativa do ar (UR)

$$UR = \frac{UR_{12} + UR_{18} + 2UR_{24}}{4} \dots\dots\dots (11)$$

3.3.6 Coeficiente psicrométrico modificado (γ^*)

$$\gamma^* = \gamma(1 + 0,33U_2) \dots\dots\dots (7)$$

3.3.7 Velocidade do vento a 2 m de altura (U_2)

Para ajustar os dados de velocidade do vento obtidos de instrumentos instalados em diferentes alturas para uma altura padrão de 2 m, para a qual a equação de Penman-Monteith-FAO (Equação 1) foi calibrada, pode-se utilizar a equação 8:

$$U_2 = U_z \left(4,868 \left(\ln(67,75Z - 5,42) \right)^{-1} \right) \dots\dots\dots (8)$$

em que,

U_z - velocidade do vento à altura Z ($m s^{-1}$);

Z - altura de medição da velocidade do vento (m).

Nas estações climatológicas principais, as leituras da velocidade do vento são registradas pelo anemógrafo universal, cujo sensores estão instalados a 10 m de altura, seguindo o padrão meteorológico de observações de superfície. Portanto, para reduzir a velocidade do vento obtida a 10 m (U_{10}) para o nível de 2 m, a equação anterior pode ser simplificada pela equação 9:

$$U_2 = 0,75 U_{10} \dots\dots\dots (9)$$

em que,

U_{10} - velocidade do vento à altura de 10 m ($m s^{-1}$).

em que,

UR_{12} , UR_{18} e UR_{24} são as umidades relativas às 12:00, 18:00 e 24:00 TMG, correspondendo às 9:00, 15:00 e 21:00 horas, de acordo com o fuso horário para o estado de Minas Gerais.

3.3.10 Radiação solar na ausência ou “topo” da atmosfera (R_a)

$$R_a = 37,586 dr (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \dots\dots\dots (12)$$

em que,

R_a - radiação solar na ausência ou no “topo” da atmosfera ($MJ m^{-2} d^{-1}$);

dr - distância relativa da Terra ao sol;

ω_s - ângulo horário do nascer ou pôr do sol (rad);

ϕ - latitude do local (rad): (-) Sul e (+) Norte;

δ - declinação solar (rad).

3.3.11 Distância relativa Terra-sol (dr)

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \dots\dots\dots (13)$$

em que,

J - dia juliano: número de dias transcorridos desde o dia 1^o de janeiro.

3.3.12 Ângulo horário do nascer ou pôr do sol (ω_s)

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \dots\dots\dots (14)$$

3.3.13 Declinação solar (δ)

$$\delta = 0,4093 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,405\right) \dots\dots\dots (15)$$

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

$$R_{ns} = (1 - r)R_s \dots\dots\dots (16)$$

em que,

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

r - albedo da cultura hipotética ($r = 0,23$);

R_s - radiação solar incidente na superfície da terra ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

3.3.15 Radiação solar incidente na superfície da Terra (R_s)

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N}\right) R_a = \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N}\right) R_a \dots\dots\dots (17)$$

em que,

n - número de horas de brilho solar (h);

a e b - coeficientes da equação de Angström-PreScott (Na parametrização proposta pela FAO para a ET_0 , $a = 0,25$ e $b = 0,50$);

N - duração astronômica do dia (h).

3.3.16 Duração astronômica do dia (N)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \dots\dots\dots (18)$$

3.3.17 Saldo de radiação de ondas longas (Rb)

$$Rb = -\left(0,9 \frac{n}{N} + 0,1\right) \left(0,34 - 0,14\sqrt{ea}\right) \sigma \left(T_{kx}^4 + T_{kn}^4\right) \frac{1}{2} \dots\dots\dots (19)$$

em que,

Rb - Saldo de radiação de ondas longas (MJ m⁻² d⁻¹);

σ - constante de Stefan-Boltzmann (4,903 x10⁻⁹ MJ m⁻² d⁻¹ K⁻⁴);

T_{kx} - temperatura absoluta máxima do ar (K);

T_{kn} - temperatura absoluta mínima do ar (K).

3.3.18 Temperatura absoluta máxima do ar (T_{kx})

$$T_{kx} = T_x + 273 \dots\dots\dots (20)$$

3.3.19 Temperatura absoluta mínima do ar (T_{kn})

$$T_{kn} = T_n + 273 \dots\dots\dots (21)$$

3.3.20 Saldo de radiação (Rn)

$$Rn = Rns + Rb \dots\dots\dots (22)$$

em que,

R_n - saldo de radiação ($MJ m^{-2} d^{-1}$).

3.3.21 Fluxo de calor no solo (G)

De acordo com Allen (1998), para períodos de até 10 dias, em escala diária, os fluxos de calor no solo, descendente e ascendente, podem ser considerados equivalentes; portanto, o fluxo de calor no solo é igual a zero ($G=0$).

3.4 Preparação dos dados para uso no SIG

Para que os dados pudessem ser manipulados pelo SIG foi necessário conhecer a posição geográfica de cada uma das estações climatológicas, o que permitiu caracterizar o chamado sistema georreferenciado. O conjunto de dados foi georreferenciado por meio das latitudes e longitudes em graus. O Datum das estações utilizadas no estudo foi South American Datum 1969 (SAD-69).

Segundo Pellegrino et al. (1998), para que se consiga gerar os mapas temáticos com uso de SIG, dois elementos básicos são exigidos:

1- um arquivo com códigos associados à localização espacial das estações, ou seja, um arquivo de pontos que representam a posição de cada estação dentro do mapa, a qual o dado será associado para posterior interpolação;

2- um arquivo com o contorno da área a ser estudada, que, no caso é o estado de Minas Gerais, para ser usado após a interpolação, como limite a partir do qual os dados não são utilizados, isto é, uma máscara para a área estudada.

O tipo de transformação das colunas de dados em informações que o SIG consiga decifrar e mapear depende do SIG escolhido. Para esse trabalho, o

escolhido para realizar o mapeamento foi o ArcInfo (ESRI, 2005), software que é, atualmente, o maior nível de trabalho do pacote ArcGis da ESRI® e possui três aplicativos: ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox (Ormsby et al., 2001).

Os mapas foram gerados no aplicativo ArcMap, que usa vários formatos para a entrada de dados, como dBase, ASCII, etc.

Para espacialização dos valores de evapotranspiração de referência (ET_0), radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação pluvial, foi necessário criar, por intermédio de um editor de textos, um arquivo dBase, contendo as informações X, Y e Z, em que X é a latitude da estação, Y a longitude da estação e Z o valor da variável a ser espacializada.

Foi feita a regionalização de todos os elementos climáticos citados para todo o estado de Minas Gerais.

O mapa vetorial do contorno do estado de Minas Gerais, que foi usado como a “máscara”, foi obtido por meio de importação de arquivos disponíveis na página da internet do Projeto Geominas (www.geominas.mg.gov.br), de responsabilidade da Secretaria de Estado da Casa Civil do Governo de Minas Gerais. Esses mapas foram gerados pela Companhia de Processamento de Dados do Estado de Minas Gerais (PRODEMG) a partir do mapa geopolítico de Minas Gerais na escala de 1:1.500.000. O sistema de referência é com coordenadas em Albers e o Datum é South American Datum 1969 (SAD-69).

3.5 Interpolação dos dados e geração dos mapas

De posse dos arquivos tipo vetor dos pontos e de vários arquivos de atributos e valores, foram gerados os mapas interpolados propriamente ditos. Esses mapas foram criados em um terceiro tipo de arquivo, no formato grade (ou grid, ou imagem, ou raster). A interpolação dos dados medidos permite estimar

outros valores para qualquer ponto no mapa, com base nos valores das estações mais próximas a este ponto (Pellegrino et al., 1998).

De acordo com Pellegrino et al. (1998), para dados quantitativos com distribuição espacial contínua, como no caso de elementos climáticos, tais como, chuvas, temperatura e evapotranspiração, a interpolação deve ser feita por meio do método do inverso quadrado da distância (MIQD).

O MIQD, tomando os doze pontos de controle mais próximos (estações meteorológicas com valores medidos para o elemento climático em questão), foi o escolhido para a interpolação deste trabalho. Isso porque, em testes preliminares, foi o que apresentou os melhores resultados. Wei & McGuinness (1973), citados por Pellegrino (1995), observaram que, para esses tipos de dados, o MIQD foi o que apresentou melhores resultados, quando comparado a outros métodos clássicos, como o de Thiessen e da média aritmética, tomando-se como padrão o método das isoietas.

Esse método assume que o valor a ser estimado para a variável em um ponto X qualquer é proporcional ao valor medido em n estações vizinhas (Y_i) e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto X e cada uma destas n estações (D_i^2). Portanto, quanto mais distante o posto estiver do ponto X, menor será seu peso, ou, em outras palavras, menor sua influência sobre o valor a ser estimado (Y_x) (Pellegrino et al., 1998).

Na equação 23, pode-se observar como é feita a interpolação.

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{D_i^2}\right)}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^2}\right)} \dots\dots\dots (23)$$

em que,

Y - valor estimado;

Y_i - valor medido na estação i;

- D_i - distância entre o ponto e a estação i ;
- n - número de estações usadas para estimativa de Y ;
- i - número da estação (variando de 1 a n).

A interpolação dos mapas foi feita seguindo a rotina descrita no fluxograma representado na Figura 3.

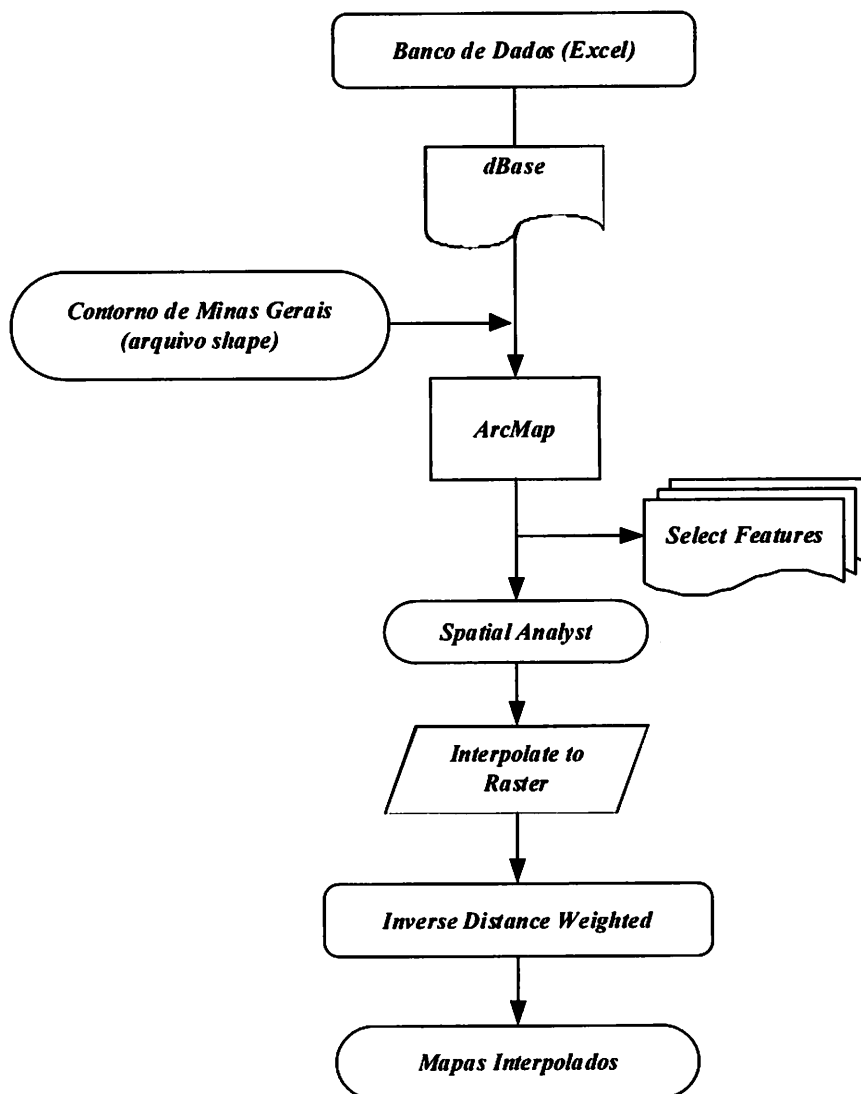


FIGURA 3 - Fluxograma da geração dos mapas interpolados.

3.6 Espacialização das variáveis estudadas

Foram gerados mapas regionalizados da evapotranspiração de referência (ET_0), estimada pelo método Penman-Monteith-FAO, das médias de precipitações pluviais, da radiação solar incidente na superfície da terra (R_s), da umidade relativa do ar (UR) e da velocidade do vento, para todo o estado de Minas Gerais. Os mapas gerados foram das médias diárias mensais e anuais para todos os elementos climáticos estudados. Para a evapotranspiração de referência e chuva também foram gerados mapas das médias dos totais anuais.

Foi feito um balanço hídrico simplificado envolvendo os dados de chuva e ET_0 , que também deu origem a um mapa regionalizado.

Por meio do mapeamento da evapotranspiração de referência (ET_0) e dos componentes climáticos que influenciam no seu resultado final, será possível a identificação da distribuição espacial e as variações sazonais dos mesmos dentro do estado, gerando, assim, subsídios para a agricultura, principalmente a irrigada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variação sazonal e espacial do total anual médio da evapotranspiração de referência (ET_0) e média da precipitação pluvial total anual

Os valores médios dos totais mensais e anuais da evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo método Penman-Monteith-FAO, para todas as estações do INMET utilizadas neste estudo, encontram-se dispostos no Quadro 2. Com esses valores, pode-se ter conhecimento da demanda hídrica das plantas para cada localidade onde se encontra uma estação climatológica. Esses valores podem subsidiar a irrigação nesses locais.

QUADRO 2. Valores médios dos totais mensais e anuais da ET_0 (mm) para as estações climatológicas do INMET

Estações	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
83388	139	114	138	101	105	105	114	146	149	147	129	133	1518
83393	142	127	130	101	86	71	80	105	110	116	110	127	1304
83437	136	125	130	111	94	86	94	126	144	133	117	125	1421
83442	144	131	128	101	87	72	78	103	107	115	110	122	1299
83479	142	114	121	101	85	76	86	108	124	121	111	124	1318
83488	127	112	108	87	71	61	67	86	91	100	93	109	1113
83492	135	120	115	90	72	58	61	79	89	99	104	120	1144
83514	133	116	113	102	94	84	99	118	120	134	126	124	1348
83531	122	111	117	98	85	78	88	118	131	123	116	115	1303
83538	116	115	108	90	76	67	76	103	105	107	104	111	1180
83543	136	123	122	92	73	60	66	89	97	108	111	126	1201
83570	135	121	122	98	76	65	69	90	101	114	114	119	1224
83577	133	114	120	101	84	71	81	109	124	131	133	120	1327
83579	125	109	112	94	81	72	80	105	108	116	108	110	1222
83338	170	128	148	127	114	108	121	159	169	151	135	148	1678
83582	126	117	112	88	72	62	66	88	96	114	110	108	1161
83586	130	118	122	100	82	71	79	104	117	121	119	124	1281

“...Continua...”

“QUADRO 2, cont.”

Estações	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
83587	129	115	122	102	83	70	77	101	114	119	118	122	1272
83589	123	111	111	85	70	58	65	85	96	105	108	115	1132
83595	160	141	140	114	87	76	81	107	108	122	124	137	1398
83632	121	111	113	92	73	62	69	95	109	113	112	117	1187
83639	127	117	109	87	66	56	61	83	89	104	107	117	1123
83642	129	112	111	84	66	52	59	80	88	98	106	118	1106
83683	119	107	106	85	67	55	63	84	98	109	114	117	1125
83687	123	111	112	89	70	59	67	89	102	113	114	117	1167
83689	116	104	101	78	64	54	58	77	88	95	101	107	1042
83481	144	126	115	109	97	82	93	126	126	134	117	120	1378
83692	122	112	103	80	65	56	61	78	87	95	100	111	1070
83736	122	106	106	80	60	47	53	73	89	106	114	116	1071
83592	127	119	114	86	71	59	64	85	98	105	109	115	1148
83377	121	103	116	99	94	90	102	132	137	121	108	110	1330
83379	120	104	120	102	91	80	91	116	123	125	113	108	1292
83618	137	129	133	98	78	65	75	94	106	134	130	127	1300
83630	126	119	115	94	82	73	85	106	113	130	116	119	1281
83646	155	134	130	94	75	67	71	90	94	107	114	130	1263
83669	129	115	121	103	82	71	84	109	128	132	136	128	1341
83695	151	134	124	92	72	60	65	85	94	110	115	131	1236
83714	107	81	83	69	51	42	48	62	74	87	89	94	887
83726	130	125	122	99	84	70	85	111	119	135	128	123	1332
83408	138	124	151	122	108	98	118	141	154	156	140	135	1583
83446	123	104	135	91	77	62	71	89	90	104	112	114	1104
83742	129	116	112	82	65	54	61	79	93	102	109	123	1127

No Quadro 3 encontram-se dispostos os valores médios dos totais mensais e anuais da precipitação pluvial registrados em todas as estações do INMET utilizadas neste trabalho. Com esses valores, pode-se ter conhecimento do potencial de oferta hídrica fornecida pela chuva para cada localidade onde se encontra uma estação climatológica.

QUADRO 3. Valores médios dos totais mensais e anuais da precipitação pluvial (mm) das estações climatológicas do INMET

Estações	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
83388	123	139	56	61	11	1	1	0	6	82	157	151	764
83393	105	98	92	50	37	8	22	8	20	110	212	171	912
83437	278	115	90	39	21	2	4	2	24	144	205	199	1086
83442	125	79	74	27	14	5	7	3	15	107	159	133	745
83479	183	174	177	83	50	1	10	3	17	147	224	184	1276
83488	107	65	58	41	15	6	6	7	20	101	161	156	728
83492	125	84	78	50	27	21	34	17	31	108	166	163	921
83514	196	139	163	107	40	13	23	8	40	180	182	223	1332
83531	253	199	136	77	24	9	13	8	50	166	189	301	1425
83481	99	66	59	32	11	2	7	3	16	51	69	106	590
83538	317	156	121	86	32	8	11	6	47	155	240	206	1268
83543	92	51	41	30	15	12	14	7	20	59	98	90	711
83570	307	140	121	69	45	11	18	3	43	122	182	237	1253
83577	212	225	174	79	37	23	16	9	55	169	207	263	1608
83579	254	187	155	99	47	24	23	9	59	187	249	320	1620
83338	89	79	33	41	18	4	3	6	4	66	98	100	510
83582	105	79	61	40	27	8	7	10	31	67	98	128	644
83586	282	174	111	48	22	7	14	7	33	135	223	255	1312
83587	284	203	132	50	22	11	16	11	38	163	236	272	1439
83589	305	183	144	77	20	12	15	7	44	173	264	264	1407
83595	207	100	166	77	74	22	35	9	66	197	273	264	1461
83632	282	176	147	64	26	15	17	8	45	172	225	280	1463
83639	187	104	133	79	66	18	23	13	71	172	208	223	1267
83642	178	139	106	53	29	18	25	16	53	137	215	214	1204
83683	271	213	163	69	50	28	31	30	60	158	200	275	1562
83687	286	205	148	59	36	25	22	23	51	129	210	268	1439
83689	270	185	127	59	34	20	21	21	51	141	233	244	1406
83692	287	204	175	81	36	25	23	24	60	157	219	257	1488
83736	278	249	153	68	53	32	25	30	60	150	193	255	1546
83592	207	108	124	62	24	7	24	5	27	104	166	185	989
83377	217	226	182	125	37	7	9	4	53	172	256	260	1550
83379	219	202	164	123	28	1	4	5	32	122	169	223	1494
83618	217	191	144	70	62	33	30	26	66	138	149	197	1341
83630	283	218	175	83	46	29	29	21	70	176	204	277	1571
83646	108	77	80	84	57	27	42	32	57	105	157	151	978
83669	289	225	157	76	46	31	30	27	60	129	187	262	1502

“...Continua...”

“QUADRO 3, cont.”

Estações	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
83695	176	95	112	82	48	18	32	27	43	121	211	194	1127
83714	322	238	176	106	74	50	38	76	79	151	195	280	1783
83726	234	181	156	61	48	39	34	27	57	123	148	245	1367
83408	141	128	62	75	24	2	6	0	5	65	79	185	771
83446	140	303	103	163	144	84	95	53	151	103	75	147	1559
83742	234	158	146	56	34	21	22	27	50	113	151	197	1186

Na prática da irrigação, devem-se minimizar as perdas de recursos, principalmente a água, procurando sempre maximizar a eficiência de seu uso. Por isso, ter conhecimento do comportamento da demanda hídrica das culturas ao longo do ano é fundamental para quem utiliza irrigação. O gráfico da Figura 4 demonstra este comportamento para os valores totais mensais médios da evapotranspiração de referência (mm) ao longo do ano, apenas para as estações de Minas Gerais contidas no Quadro 2. Observa-se, de maneira geral, que, para todas as estações, os valores de ET_0 apresentam variações semelhantes ao longo do ano, em que os valores estimados da ET_0 apresentam-se decrescentes de janeiro a junho, passando a ser crescente de junho a dezembro. Os menores valores estimados de ET_0 ocorreram no período de abril a agosto, tendo os valores mínimos sido no mês de junho. Isso indica que, nesse período, a demanda por água pelas plantas é menor, se comparado ao restante do ano, devendo-se, então, tomar precauções e decisões para não desperdiçar água na prática da irrigação. Ainda no gráfico da Figura 4, pode-se observar também que, com algumas exceções, os maiores valores estimados de ET_0 para as estações de Minas Gerais foram registrados no mês de janeiro, sendo esse período o de maior demanda hídrica pelas culturas no estado.

Comportamento da ET₀ total mensal média durante o ano

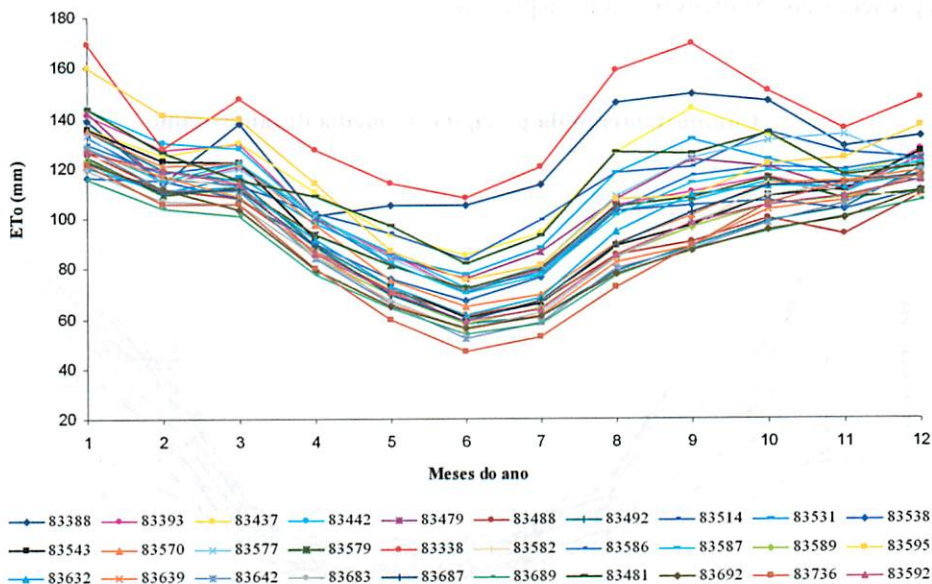


FIGURA 4 - Comportamento dos totais mensais médios da ET₀ (mm) ao longo do ano.

Em virtude da água ser o componente principal na constituição dos organismos vivos, a distribuição temporal e espacial das precipitações pluviais é um dos fatores que condicionam o clima e que estabelecem o tipo de vida de uma determinada região, ou seja, é um fator importantíssimo para se determinar a aptidão agrícola de cada região.

O gráfico da Figura 5 encontra-se representado o comportamento dos valores totais mensais médios da precipitação pluvial (mm) ao longo do ano para as estações climatológicas de Minas Gerais. Observa-se que, de forma geral, as variações das precipitações pluviais apresentaram-se semelhantes durante o ano, e que o trimestre mais chuvoso inclui os meses de novembro, dezembro e janeiro, nos quais foram detectados os maiores valores de chuva no estado. O

trimestre mais seco é formado pelos meses de junho, julho e agosto, que apresentaram os menores índices pluviais.

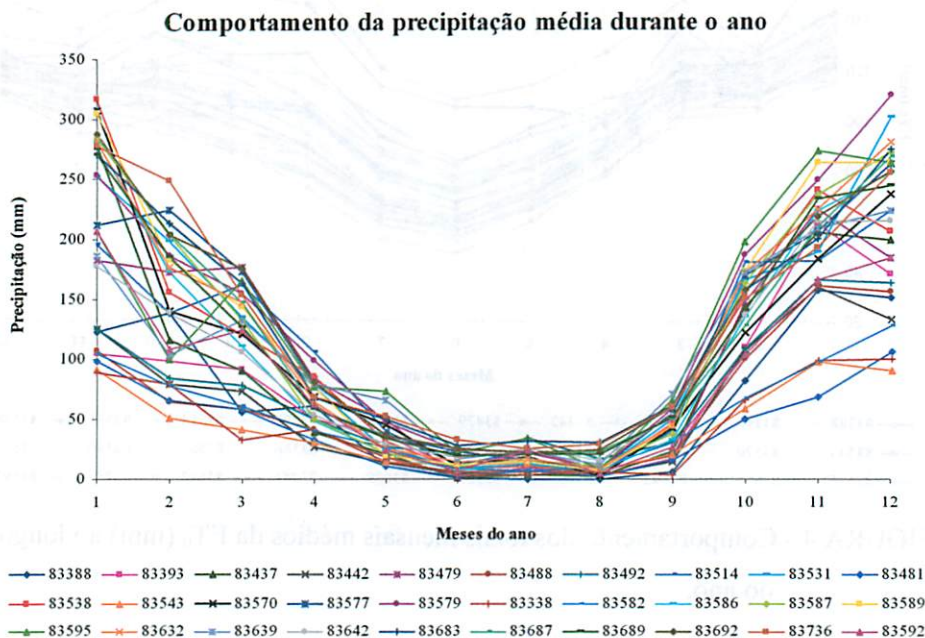


FIGURA 5 - Comportamento dos totais mensais médios da precipitação pluvial (mm) ao longo do ano.

Ainda no gráfico da Figura 5 observa-se que, nos meses que apresentaram os maiores índices pluviais, a amplitude dos totais mensais entre as estações foram maiores, tendo desde estações que apresentaram valores de 317 mm no mês de janeiro até estações que registraram 89 mm no mesmo mês. Já nos meses de menores índices pluviais, essa amplitude é menor, havendo estações com valores de aproximadamente 31 mm no mês de agosto até estações com 0 (zero) mm no mesmo mês. Este fato mostra que o estado de Minas Gerais apresenta uma grande diversidade climática, possuindo regiões nas quais a

precipitação pluvial é abundante até regiões onde esse elemento climático é escasso.

Quando comparados os gráficos das Figuras 4 e 5, pode-se observar que, nos meses em que ocorreram os menores valores de evapotranspiração de referência, também ocorreram os menores índices de pluviosidade. Este fato indica que, mesmo que a demanda por água pelas plantas seja menor, a oferta de água da chuva também é pequena, havendo, assim, a necessidade da irrigação para fornecer essa demanda das culturas. Dependendo da região, esta irrigação pode ser de caráter total ou apenas de forma a complementar a oferta da chuva. Isto é melhor visualizado quando se observa que os menores valores de ET_0 não foram inferiores a 40 mm por mês, enquanto que os menores valores de precipitação pluvial registrados chegaram a zero milímetro (mm), em algumas localidades do estado.

Ainda nesta comparação, pode-se observar também que, para a maioria das estações, nos meses em que ocorreram os maiores valores de evapotranspiração de referência, também ocorreram os maiores índices de pluviosidade. Índices esses acima dos 100 mm para quase todas as estações, com exceção das estações da região norte e nordeste do estado. Isto mostra que mesmo que a oferta de água pela chuva seja grande, a demanda das plantas por água também ocorre numa escala maior. Este fato não descarta o uso da irrigação nessas épocas, principalmente nas regiões norte e nordeste, onde, durante quase todo o período, os valores de ET_0 total mensal superam os valores de chuva total mensal. Porém, na maioria das regiões do estado, a necessidade da irrigação pode passar a ser apenas de forma a complementar a demanda hídrica das plantas, visto que apresentam um índice de chuva elevado nessas épocas.

Outro motivo que faz com que a irrigação não seja descartada nas épocas de maior precipitação pluvial é o fato das chuvas não ocorrerem de forma

distribuída no tempo e no espaço. Ou seja, pode ser que uma grande parte dessas chuvas ocorra de forma concentrada em um curto período, ocasionando, assim, a existência de veranicos durante esses períodos de maiores precipitações pluviais.

Nos mapas das Figuras 6 e 7, tem-se a distribuição espacial da evapotranspiração de referência total anual média (mm) e da precipitação pluvial total anual média (mm), respectivamente, para todo o estado de Minas Gerais.

Pode-se observar, no mapa da Figura 6, que os menores valores médios de ET_0 total anual foram registrados nas regiões Sul, Campo das Vertentes e Zona da Mata, chegando a um valor de 914 mm ano^{-1} no extremo sul. Observa-se, ainda, que o valor médio da ET_0 total anual apresenta um comportamento crescente, partindo da região Sul indo em sentido às regiões Noroeste e Norte, tendo os maiores valores médios da ET_0 total anual sido registrados na região Norte do estado, chegando a um valor máximo de $1.977 \text{ mm ano}^{-1}$ no extremo norte. As maiores variações espaciais dos valores de ET_0 foram visualizadas nas regiões Norte e Nordeste (Jequitinhonha). Por outro lado, as regiões do Triângulo e Noroeste apresentaram as menores variações espaciais da ET_0 .

No mapa da Figura 7, observa-se que a precipitação pluvial apresenta um comportamento oposto ao da ET_0 . Isso é detectado quando se observa que os menores valores totais anuais médios da chuva foram registrados na região Norte, chegando a um valor mínimo de 512 mm ano^{-1} no extremo norte. Por outro lado, os maiores valores totais anuais médios chuva foram registrados na região sul, chegando a um valor máximo de $1.748 \text{ mm ano}^{-1}$ no extremo sul.

A distribuição espacial da chuva em todo o estado apresentou uma maior variabilidade quando comparada à distribuição espacial da ET_0 . Isso se dá pelo fato da chuva ser um elemento meteorológico que apresenta uma alta variabilidade, tanto espacial como temporal. A região Sul foi a que apresentou uma menor variabilidade espacial da precipitação pluvial, mostrando que se trata de uma região mais homogênea no que diz respeito a este elemento.

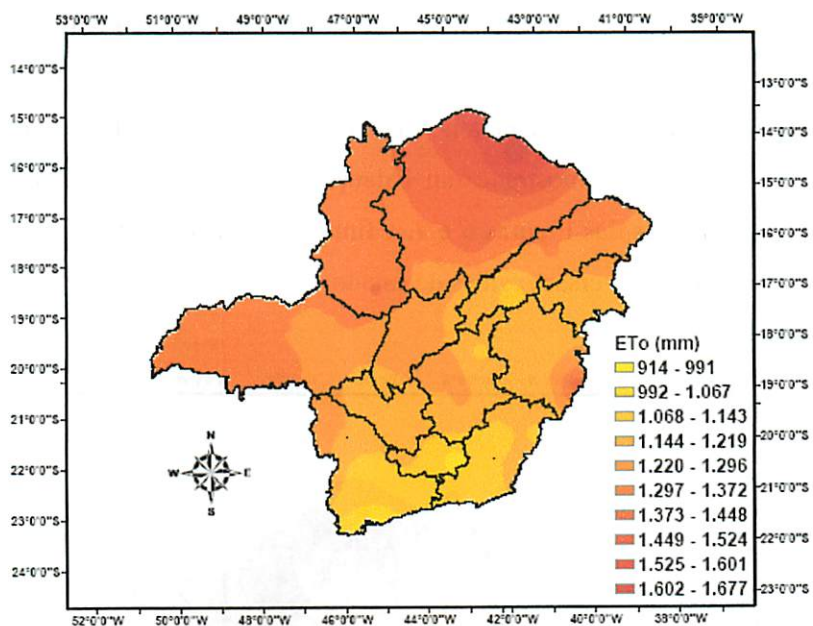


FIGURA 6 - Total anual médio da ET₀ (mm) para o estado de Minas Gerais.

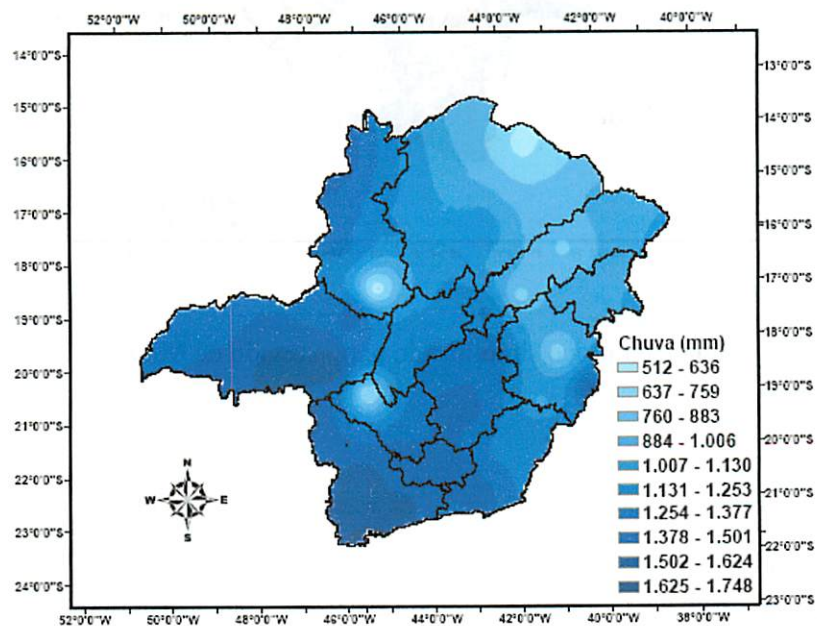


FIGURA 7 - Total anual médio da chuva (mm) para o estado de Minas Gerais.

O conhecimento da evapotranspiração, associado ao ganho de água por meio das chuvas, permite determinar as disponibilidades hídricas de uma região, sendo assim de grande importância no planejamento agrícola. Em função disso, no mapa da Figura 8 é mostrado um balanço hídrico de forma simplificada, envolvendo os mapas das Figuras 6 e 7, a fim de visualizar melhor a oferta e a demanda hídrica nas diversas regiões do estado.

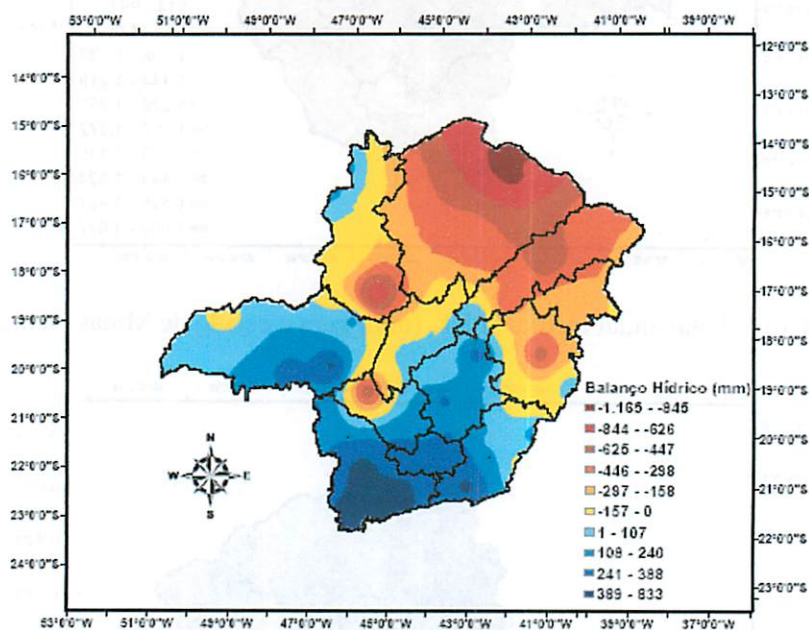


FIGURA 8 - Balanço hídrico simplificado para o estado de Minas Gerais.

Observa-se, na Figura 8, entre as tonalidades no mapa de vermelho a amarelo, que Minas Gerais apresenta um déficit hídrico em cerca de 50% da área total de seu território. As regiões Norte e Nordeste (Jequitinhonha) são aquelas onde a média total anual da evapotranspiração de referência supera a média do total anual da chuva em maior quantidade, apresentando um maior déficit de

água no ano, havendo localidades nas regiões do extremo norte em que o déficit hídrico chegou a $1.165 \text{ mm ano}^{-1}$.

Esse comportamento, em que a evapotranspiração supera a chuva, é uma característica peculiar de regiões semi-áridas, como é o caso da região Norte e do Jequitinhonha. Nessas regiões de déficit hídrico, o uso da irrigação é fundamental para se obter uma boa produção agrícola, porém, essa prática deve ser bem manejada para não ocorrer desperdício de água. Por esta razão, alguns trabalhos (Fuchs et al., 1987; Jensen & Wright, 1978; Mohammad & Al-Amoud, 1993) têm mostrado a importância e a necessidade de estimar corretamente a evapotranspiração das culturas, ou seja, a demanda hídrica na agricultura, visando o manejo racional da irrigação e a otimização da eficiência do uso da água nas regiões onde o recurso hídrico é pouco disponível, como é o caso das regiões de clima semi-árido de Minas Gerais.

Por outro lado, nas regiões Sul, Sudeste, Oeste e Central, o valor total anual médio da chuva superou a ET_0 anual média, gerando, assim, um excesso hídrico nessas regiões. A região onde esse excesso foi maior, chegando a atingir o valor de 833 mm ano^{-1} , foi no extremo sul. Esse fato não descarta o uso da irrigação nessas regiões, porém, mostra a aptidão de algumas localidades para a prática de uma agricultura sem o uso da irrigação, como é o caso da região Sul, onde grande parte do território é cultivada com a cultura do cafeeiro sem o uso da irrigação. Já na região do Triângulo Mineiro, onde também houve excesso hídrico, porém, em menor escala, a cultura do cafeeiro é realizada, na sua maioria, com o uso da irrigação.

No mapa da Figura 9 é apresentada a distribuição espacial dos coeficientes de variação dos totais anuais da evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO, para todo o estado de Minas Gerais.

Esse mapa (Figura 9) mostra a variação temporal da ET_0 estimada para as estações usadas no trabalho. Observa-se que as maiores variações temporais da ET_0 foram registradas nos extremos das regiões Norte e Nordeste (Jequitinhonha) do estado, chegando a valores na ordem de 10,29% de variação no extremo norte. Isso mostra que nessas regiões podem ocorrer anos com altas demandas hídricas e anos com demandas hídricas reduzidas. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que regiões de clima árido e semi-árido geralmente apresentam grandes instabilidades climáticas se comparadas a outras regiões, principalmente em relação à precipitação pluvial, que pode influenciar na ET_0 .

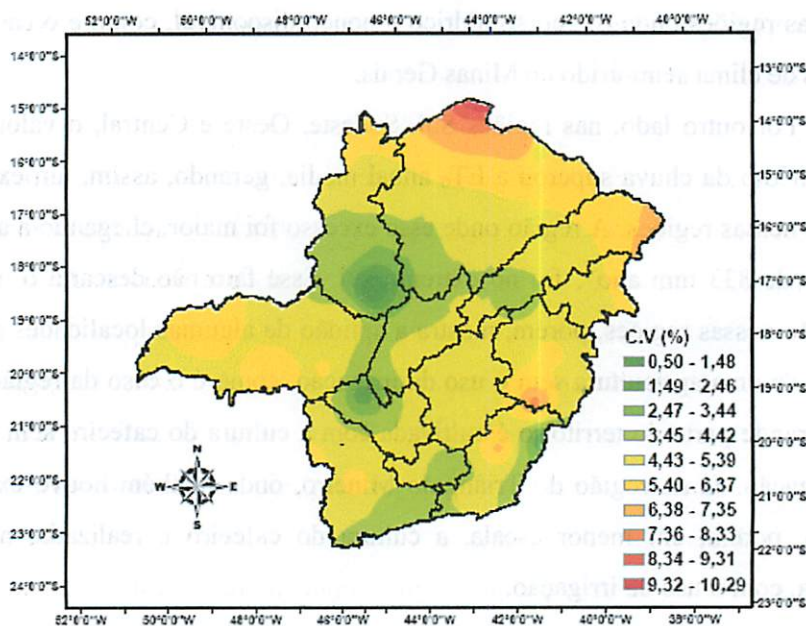


FIGURA 9 - Espacialização dos coeficientes de variação dos totais anuais de ET_0 para o estado de Minas Gerais.

Devido à maior instabilidade da demanda hídrica (ET_0) nas regiões Norte e Nordeste do estado, os projetistas e usuários da irrigação nessas localidades devem tomar maiores cuidados na estimativa da ET_0 na elaboração e manejo de projetos de irrigação.

Já as menores variações temporais foram registradas no noroeste, no oeste, no sul e no sudeste (Zona da mata) de Minas. Essas regiões em que se encontram os menores coeficientes de variação são regiões que, provavelmente, apresentam climas mais estáveis, gerando demandas hídricas semelhantes todos os anos. Isso pode facilitar a prática da irrigação nessas localidades.

4.2 Análise das variações espaciais da evapotranspiração de referência (ET_0) diária média anual, da radiação solar incidente na superfície, umidade relativa do ar e velocidade do vento

Nos mapas das Figuras 10 a 13 são mostradas a distribuição espacial da média anual da evapotranspiração de referência (ET_0), a radiação solar incidente na superfície (R_s), a umidade relativa do ar (UR) e a velocidade do vento durante o dia no Estado de Minas Gerais.

Observa-se, pela análise destes mapas, que a distribuição espacial dos elementos climáticos R_s , UR e velocidade do vento é bem semelhante à distribuição espacial da ET_0 e que, de forma geral, quanto maiores forem os valores de disponibilidade de energia (na forma de radiação solar incidente - R_s), velocidade do vento e quanto menor a umidade relativa do ar, maior foi a taxa de evapotranspiração de referência. Esse comportamento já foi comprovado em diversos trabalhos e citado por Evangelista (1999).

Observa-se que o elemento climático que apresentou uma maior variabilidade espacial foi a velocidade do vento (Figura 14). Isso pode ser explicado pela presença de uma topografia altamente irregular no estado de

Minas Gerais, visto que a velocidade do vento é diretamente afetada pela topografia da superfície terrestre.

Semelhante o que é mostrado no mapa da Figura 7 para os totais anuais de ET_0 , observa-se que os menores valores médios de ET_0 diária média anual (Figura 10) foram registrados nas regiões Sul e Sudeste de Minas Gerais, chegando a valores da ordem de $2,51 \text{ mm d}^{-1}$ no extremo sul e que os maiores valores médios de ET_0 diária média anual foram registrados na região Norte, chegando a um valor máximo de $4,59 \text{ mm d}^{-1}$ no extremo norte do estado.

Observando-se a distribuição da radiação solar incidente na superfície da terra (R_s) (Figura 11) e comparando-a com a umidade relativa do ar (Figura 12) e a velocidade do vento (Figura 13), verifica-se que a R_s foi a que apresentou o comportamento da distribuição espacial mais próximo possível do comportamento da distribuição espacial da evapotranspiração de referência (ET_0). Assim, pode-se afirmar que a radiação solar incidente na superfície foi o elemento climático que mais influenciou no resultado final da ET_0 . Esses resultados correspondem às afirmações de autores, como Chang (1971) e Amatya et al. (1992), os quais afirmam que a radiação é o elemento mais importante na determinação da ET_0 .

No mapa da Figura 11, também pode ser visualizado que, de forma generalizada, as regiões que apresentaram os maiores valores de radiação solar incidente na superfície corresponderam às regiões onde ocorreram os maiores valores de evapotranspiração de referência (Figura 10).

Observa-se, ainda no mapa da Figura 11, que os menores valores diários médios anuais de R_s foram registrados nas regiões Sul e Sudeste (Zona da Mata), chegando a um valor de $14,64 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no extremo sul e que o valor médio da R_s apresenta um comportamento crescente partindo da região Sul, Zona da Mata e Noroeste, no sentido das regiões Sudoeste, Noroeste e Norte. Os maiores valores médios de R_s foram registrados nas regiões Norte e Triângulo

Mineiro, chegando a um valor máximo de $19,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no extremo norte do estado. O comportamento crescente do sul para o norte é explicado pelas latitudes que diminuem também no mesmo sentido (sul-norte); quanto menor é a latitude de um local, mais próximo do Equador encontra-se e maior é a incidência de radiação solar nesse local.

Analisando-se a umidade relativa do ar (Figura 12), verifica-se um comportamento contrário aos outros elementos climáticos, ou seja, os locais onde foram registrados os maiores valores de umidade relativa do ar (UR) correspondem às regiões onde ocorreram os menores valores de evapotranspiração de referência (ET_0).

Isso ocorre porque a umidade relativa de um local determina o déficit de pressão de vapor (diferença entre a pressão de saturação do vapor d'água e a parcial ($e_s - e_a$)), representando o quanto de vapor é necessário para saturar determinado volume de ar. Sendo o déficit de pressão de vapor um indicador da capacidade evaporativa do ar, quanto maior for a umidade relativa do ar, menor será a evapotranspiração, pois o ar está sempre próximo da saturação.

O mapa da Figura 13 mostra a representação da média anual da velocidade do vento para o estado de Minas Gerais. Pode-se observar que o comportamento espacial do vento foi o que mais diferiu do comportamento espacial da ET_0 (Figura 10), Portanto o vento teve menor influência no valor final da ET_0 , comparado aos elementos climáticos, como a radiação solar e a umidade relativa do ar. Tais resultados são compatíveis com os de Chang (1971), que afirma que a importância relativa da radiação, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento é de, aproximadamente, 80%, 6% e 4%, respectivamente.

Observa-se também que os maiores valores de velocidade do vento foram registrados nas regiões Norte e Nordeste, onde o clima é semi-árido. Evidencia-se, assim, um aumento no processo de advecção e, conseqüentemente,

um aumento na evapotranspiração, principalmente em áreas irrigadas, visto que, de acordo com Hargreaves (1994), a advecção ocorre quando um vento quente e seco sopra sobre uma área úmida.

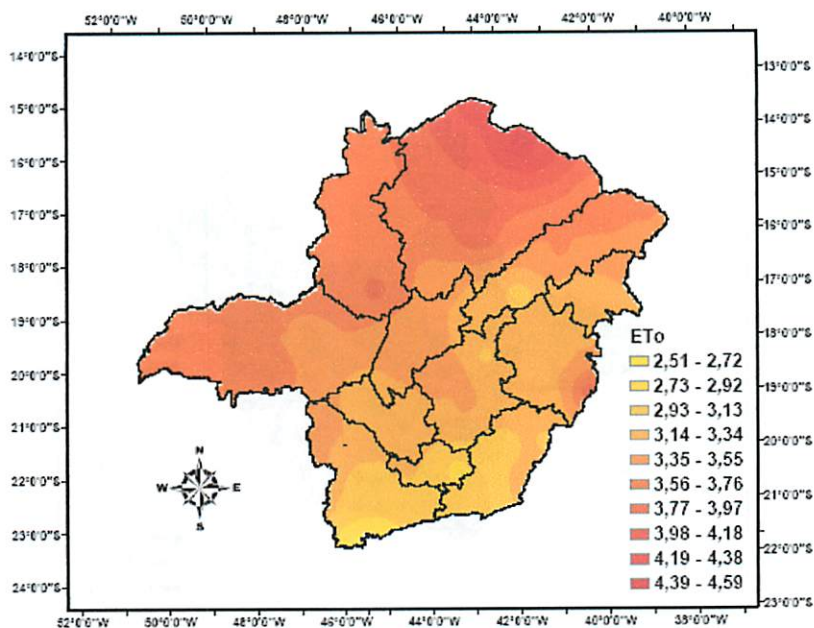


FIGURA 10 - Média anual da ET₀ diária (mm d⁻¹), para Minas Gerais.

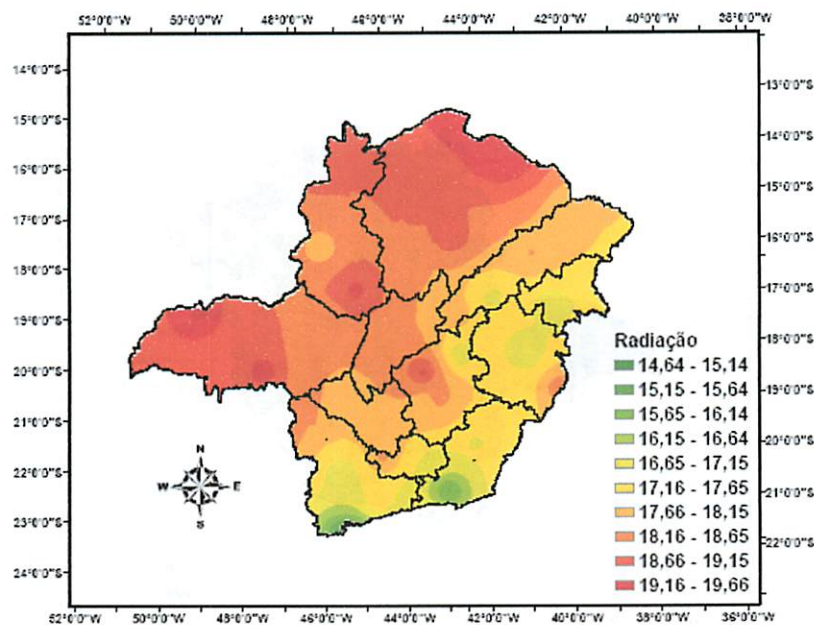


FIGURA 11 - Radiação solar (MJ m⁻² d⁻¹) média anual, para Minas Gerais.

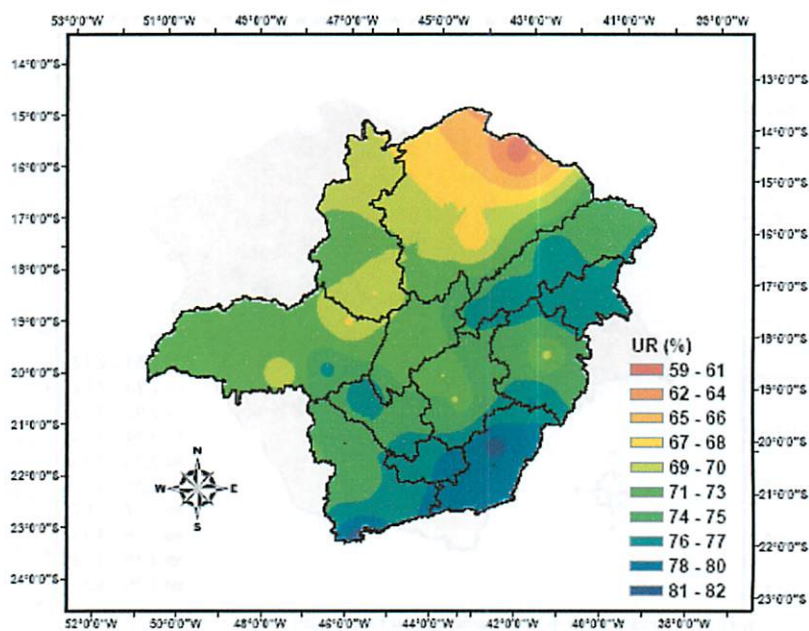


FIGURA 12 - Umidade relativa do ar (%) média anual, para Minas Gerais.

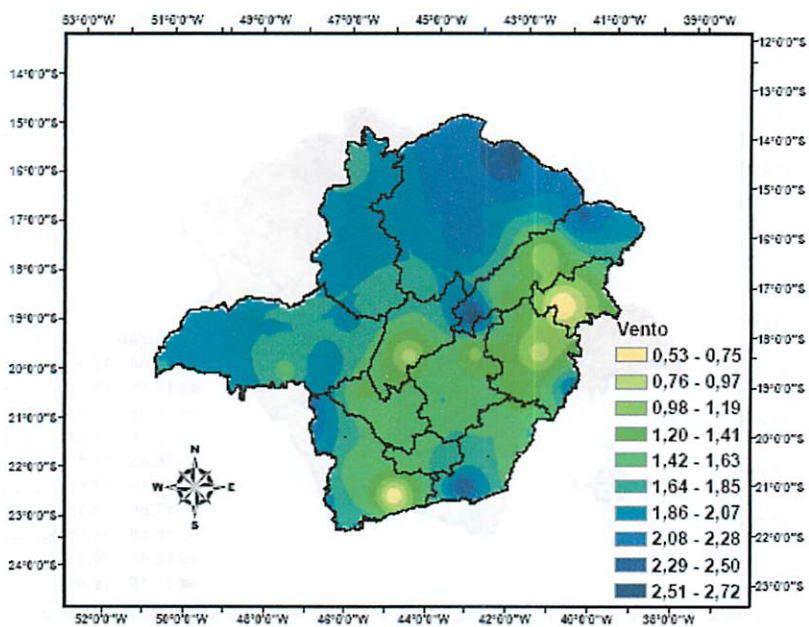


FIGURA 13 - Velocidade média anual do vento ($m\ s^{-1}$), para Minas Gerais.

O gráfico da Figura 14 mostra as variações nos valores de ET_0 , estimada pelo modelo de Penman-Monteith-FAO, em função das variações nos valores de radiação solar incidente na superfície (R_s), da umidade relativa do ar (UR) e da velocidade do vento. Observa-se, na mesma Figura, que, entre os elementos climáticos analisados, o que mais influenciou no valor final da ET_0 foi a R_s , seguida da UR e da velocidade do vento. Este resultado já foi observado no comportamento dos mapas espacializados desses elementos climáticos em relação ao mapa de ET_0 . Observa-se também que uma grande variação no valor de velocidade do vento ocasiona uma variação pequena no valor de ET_0 , mostrando sua pequena influência. Por outro lado, para uma variação qualquer no valor da R_s , ocorre uma variação no valor de ET_0 maior que a aquela aplicada ao valor de R_s , comprovando seu maior grau de importância para a estimativa deste elemento.

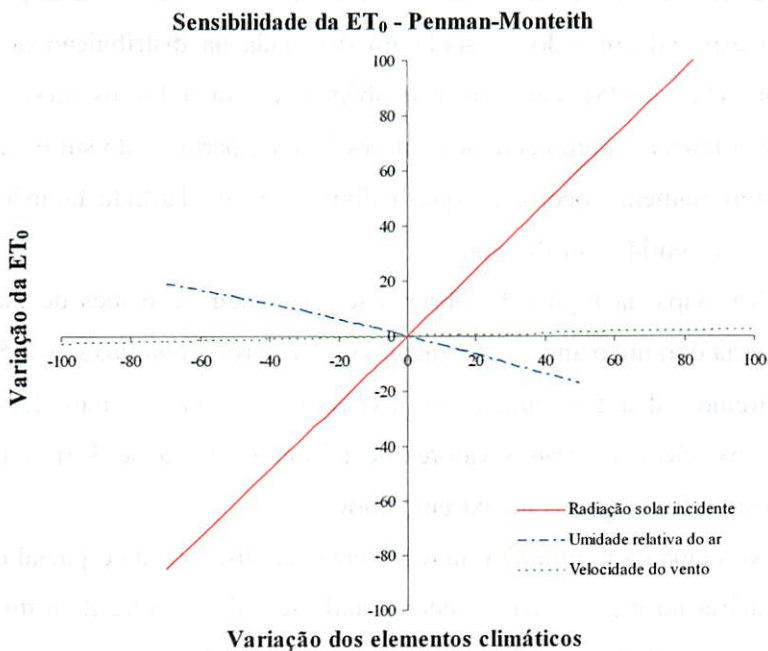


FIGURA 14 - Sensibilidade da ET_0 estimada por Penman-Monteith-FAO para variações nos valores de R_s , UR e velocidade do vento.

4.3 Distribuição temporal e espacial da evapotranspiração de referência

diária (ET_0) média mensal

Nos mapas das Figuras 15 a 26 são mostradas as distribuições espaciais das médias da ET_0 diária no estado de Minas Gerais para todos os meses do ano.

Analisando-se o ano por completo, pode-se observar que as maiores variabilidades nas distribuições espaciais ocorreram de forma generalizada na região Norte, comportamento também registrado na média dos totais anuais (Figura 6). Isso mostra, novamente, que o Norte é uma região de grande variabilidade espacial. Por outro lado, as menores variabilidades foram encontradas na região do Triângulo Mineiro.

A distribuição espacial apresentou um comportamento semelhante em todo o estado, entre os meses de abril e outubro (Figuras 18 a 24). A maior variação espacial em todo o estado foi detectada na distribuição do mês de novembro (Figura 25). Observa-se também que, em todos os meses do ano, existe uma tendência crescente dos valores de ET_0 , partindo do sul para o norte. Esse comportamento ocorre porque a diminuição da latitude também ocorre neste mesmo sentido (Sul-Norte).

No mapa da Figura 15 observa-se que janeiro é o mês de maior ET_0 média diária durante o ano, sendo encontrados valores numa faixa de $3,51 \text{ mm d}^{-1}$ no extremo sul a $5,47 \text{ mm d}^{-1}$ no extremo norte. Para o mês de fevereiro (Figura 16), são encontrados valores de ET_0 numa faixa de $3,01 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $5,04 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte.

No mapa da Figura 17 está representada a distribuição espacial da média da ET_0 diária no mês de março, encontrando-se valores entre $2,78 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $4,78 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte. Observa-se, ainda, que o comportamento da ET_0 na região central, indo no sentido oeste, apresentou uma

distribuição espacial pouco variável, com valores de ET_0 dentro de uma faixa de 3,39 mm d^{-1} a 3,78 mm d^{-1} . Para o mês de abril (Figura 18), no qual há uma tendência de diminuição da ET_0 , foram registrados valores de ET_0 numa faixa de 2,35 mm d^{-1} no extremo sul a 4,23 mm d^{-1} no extremo norte. Observa-se, ainda, que a região do Triângulo Mineiro e o Oeste do Estado apresentaram uma distribuição espacial pouco variável.

No mapa da Figura 19, está representada a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de maio, sendo encontrados valores numa faixa de 1,71 mm d^{-1} , no extremo sul a 3,68 mm d^{-1} , no extremo norte. De forma generalizada, o comportamento espacial da ET_0 é semelhante ao do mês de abril (Figura 18), apenas ocorrendo uma diminuição dos valores de evapotranspiração de referência estimados.

No mapa da Figura 20, pode ser visualizada a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de junho. Neste mês, foram registrados os menores valores de ET_0 estimada, que ficaram na faixa de 1,44 mm d^{-1} , no extremo sul a 3,61 mm d^{-1} , no extremo norte. O mês de junho apresentou um comportamento espacial semelhante o de abril (Figura 18) e o de maio (Figura 19).

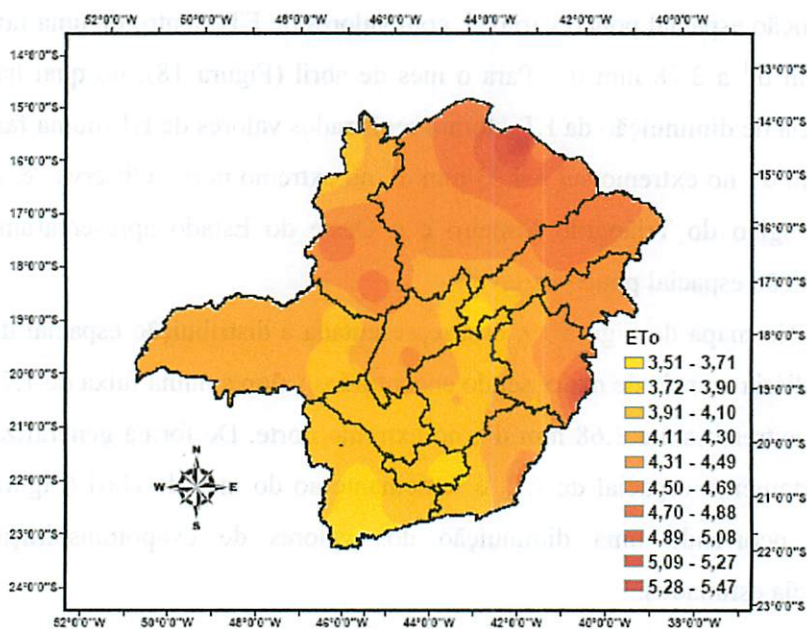


FIGURA 15 – Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de janeiro.

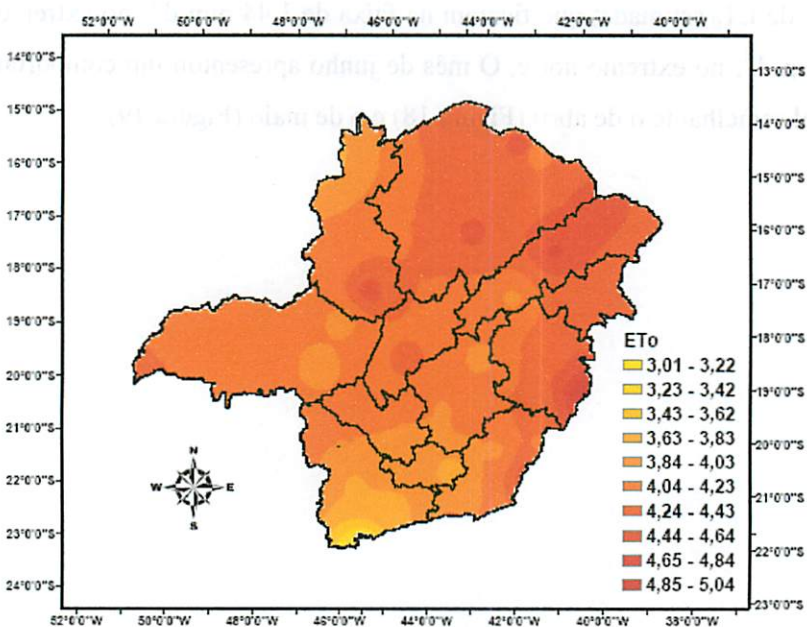


FIGURA 16 – Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de fevereiro.

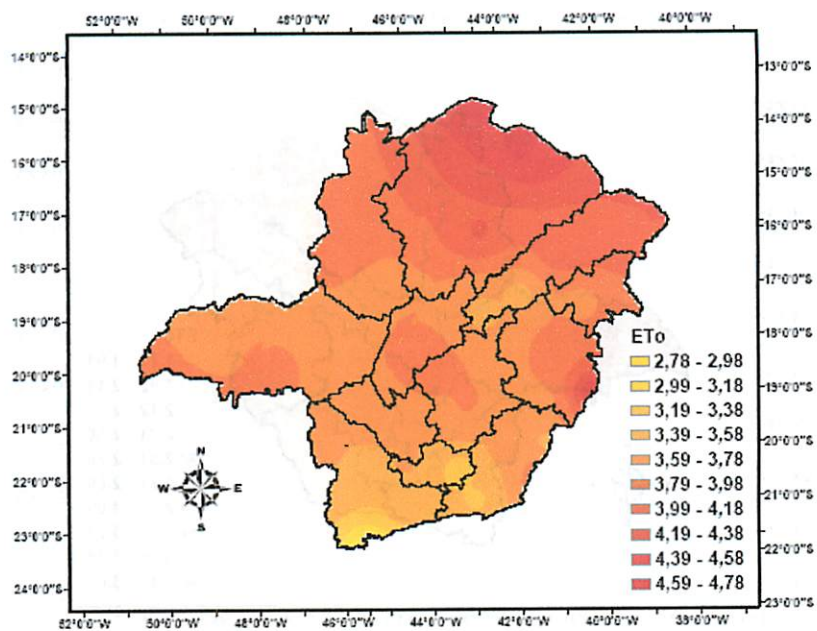


FIGURA 17 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de março.

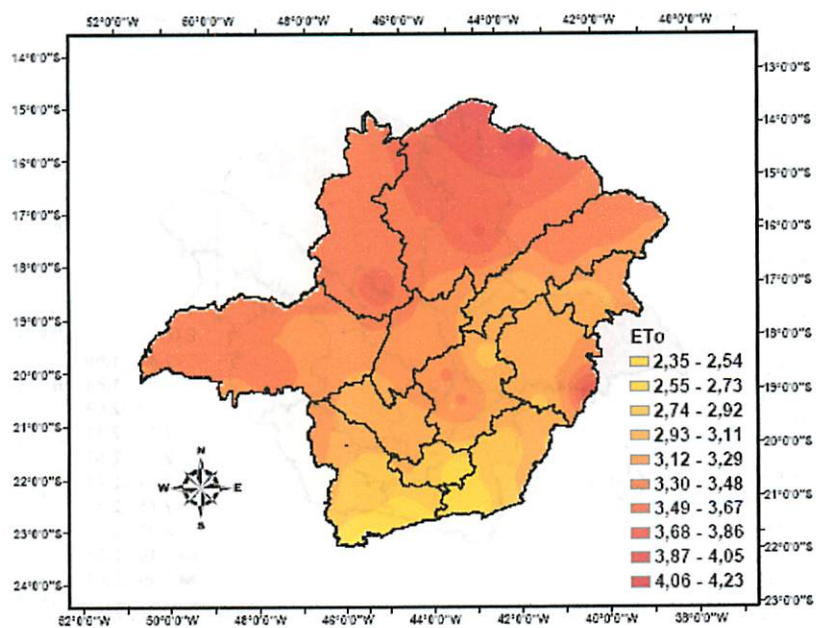


FIGURA 18 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de abril.

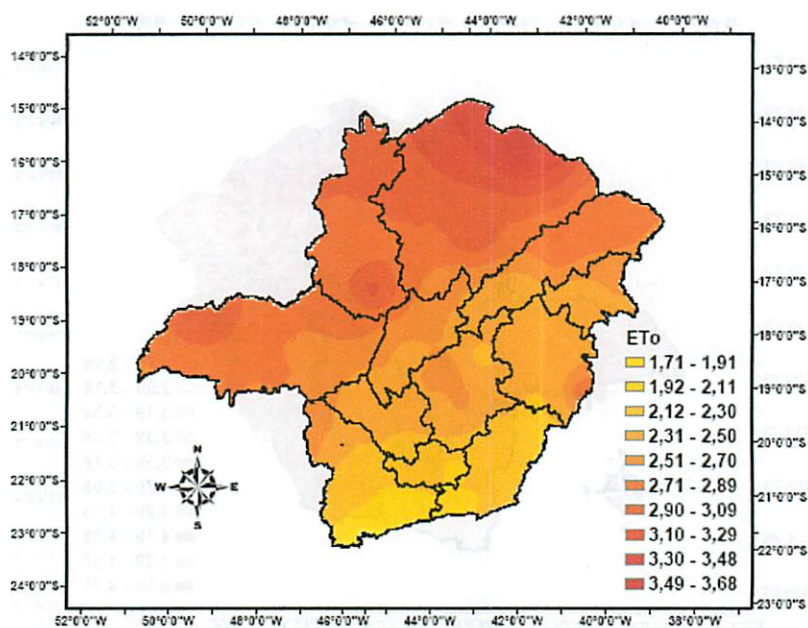


FIGURA 19 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de maio.

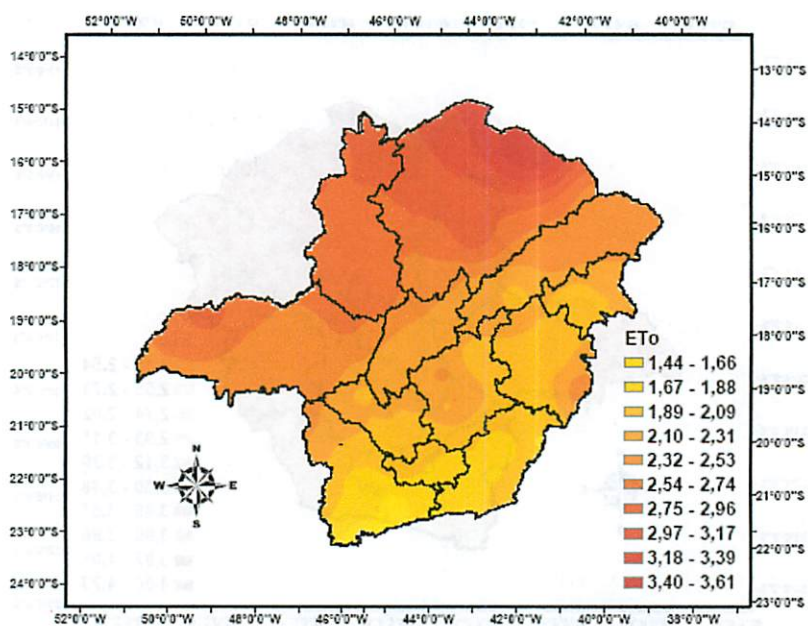


FIGURA 20 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de junho.

Para o mês de julho (Figura 21), os valores de ET_0 estimada voltaram a subir em relação a junho, que foi o mês de menores índices. Os valores de ET_0 do mês de julho ficaram na faixa de $1,59 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $3,89 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte. De forma generalizada, o comportamento espacial da ET_0 foi muito semelhante ao do mês de junho (Figura 20), apenas ocorrendo um aumento dos valores de evapotranspiração de referência.

No mapa da Figura 22, pode-se visualizar a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de agosto. Os valores de ET_0 naquele mês ficaram na faixa de $2,07 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $5,13 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte, com tendência crescente da ET_0 do sul para o norte. Observa-se que o comportamento da distribuição espacial da ET_0 no mês de agosto inicia uma tendência de mudança.

O mapa da Figura 23 mostra a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de setembro. Os valores de ET_0 estimada continuaram a subir em relação ao mês anterior, tendo esses valores ficado na faixa de $2,55 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $5,64 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte. No mês de setembro continua a tendência crescente do valor de ET_0 indo do sul para o norte do estado.

No mapa da Figura 24 pode ser visualizada a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de outubro. Os valores de ET_0 no mês de outubro ficaram na faixa de $2,88 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $4,96 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte, com tendência crescente do sul para o norte. O comportamento da distribuição espacial da ET_0 no mês de outubro apresenta semelhança com a do mês de setembro, só que a variabilidade espacial apresenta uma tendência a aumentar do mês de setembro para o de outubro.

No mapa da Figura 25 está representada a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de novembro, sendo encontrados valores de ET_0 numa faixa de $3,06 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo sul a $4,58 \text{ mm d}^{-1}$, no extremo norte. O mês de novembro foi o mês que apresentou a maior variação da distribuição espacial da ET_0 em todo estado, principalmente nas regiões de menores variações durante os

outros meses do ano, como é o caso da região que vai do Triângulo Mineiro até o Oeste de Minas Gerais.

No mapa da Figura 26 observa-se a distribuição espacial da ET_0 média diária no mês de dezembro. Neste mês foram registrados valores de ET_0 numa faixa de 3,11 mm d⁻¹, no extremo sul a 4,77 mm d⁻¹, no extremo norte. Observa-se que o comportamento espacial da ET_0 no mês de dezembro tende a se assemelhar ao do mês de janeiro, indicando a existência de um comportamento cíclico de um ano para o outro.

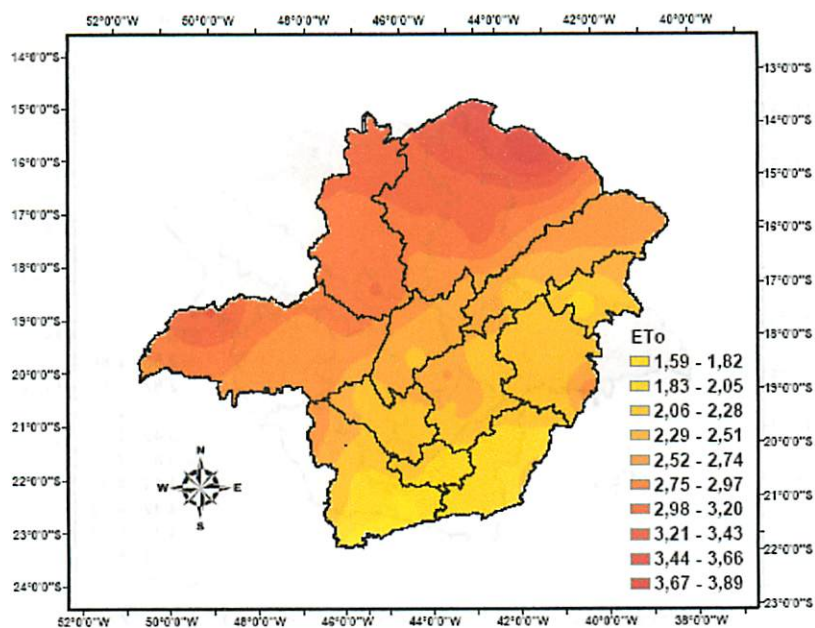


FIGURA 21 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de julho.

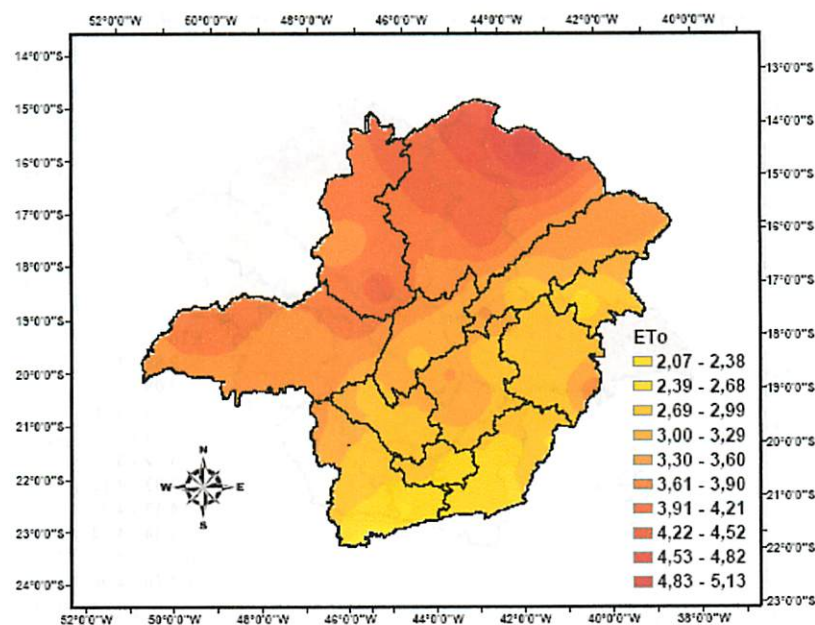


FIGURA 22 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de agosto.

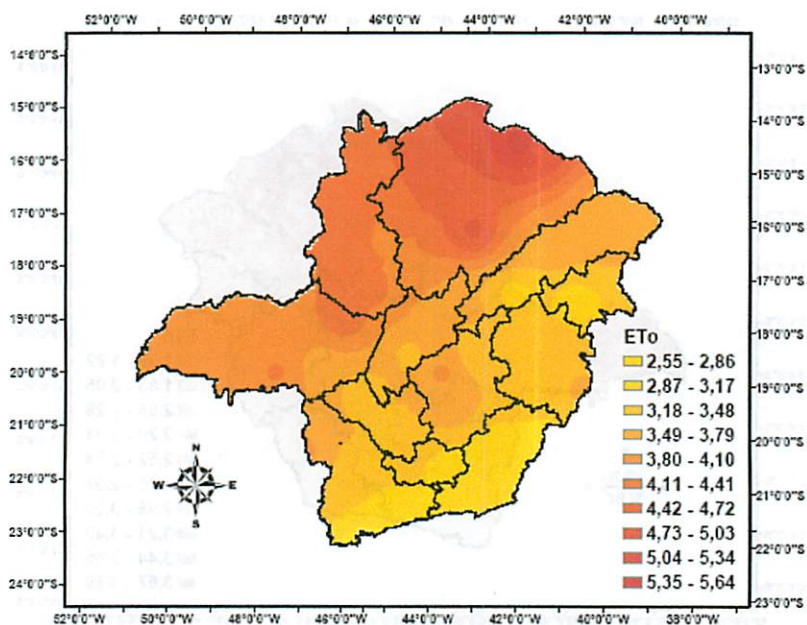


FIGURA 23 - Média diária da ET₀ (mm d⁻¹), no mês de setembro.

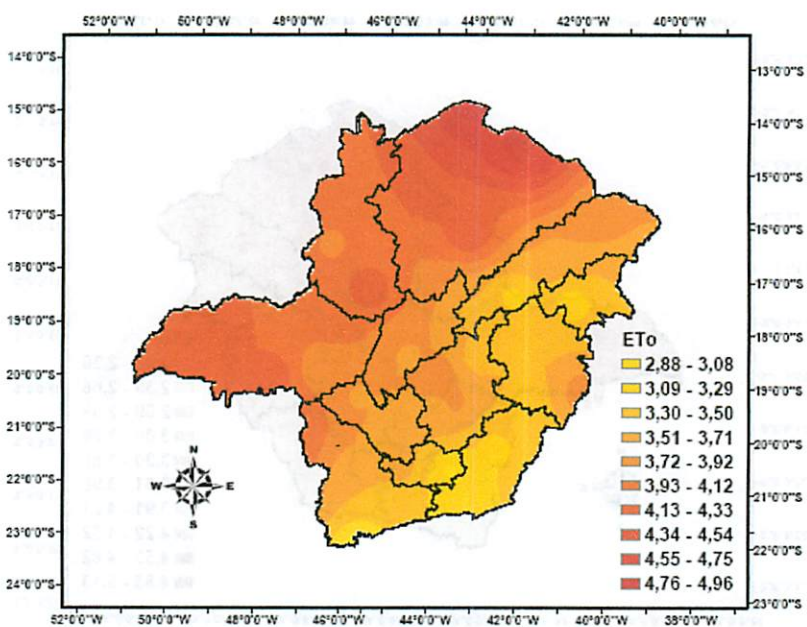


FIGURA 24 - Média diária da ET₀ (mm d⁻¹), no mês de outubro.

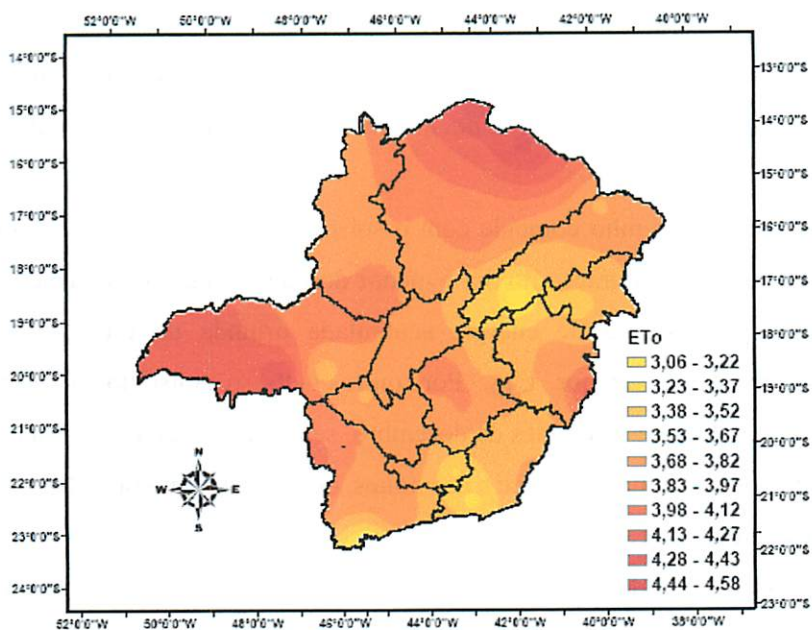


FIGURA 25 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de novembro.

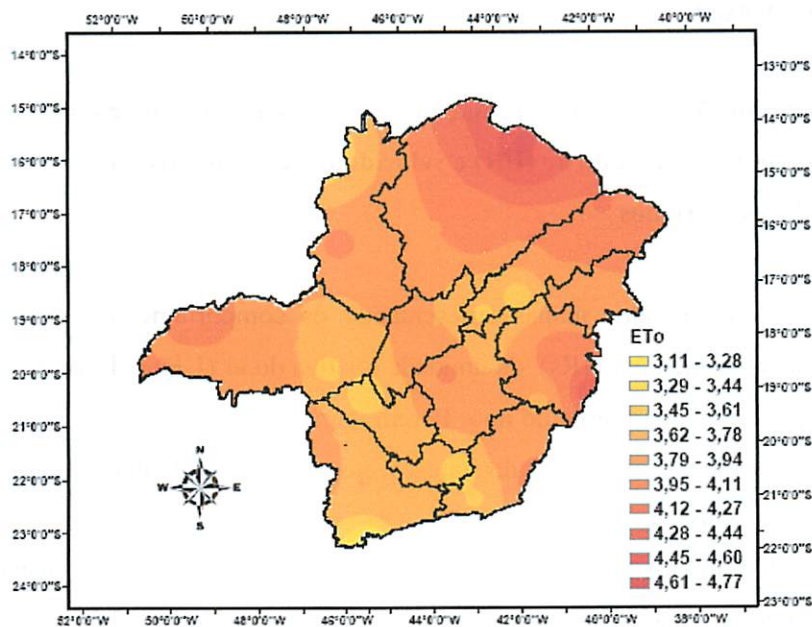


FIGURA 26 - Média diária da ET_0 (mm d^{-1}), no mês de dezembro.

Sendo a R_s o principal elemento que interfere na ET_0 (Chang, 1971), o comportamento da ET_0 de um mês para o outro é explicado pela variação de energia disponível na superfície, devido ao movimento aparente e cíclico do sol durante o ano.

O mês de junho coincide com o solstício de inverno para o hemisfério sul. Nessa época, a duração do dia é menor do que a noite, ocasionando, assim, menor disponibilidade de energia acumulada oriunda da radiação solar e, conseqüentemente, menor ET_0 . Por outro lado, o solstício de verão no hemisfério sul inicia-se no mês de dezembro, sendo, nessa estação, os meses têm a duração dos dias maior do que a das noites, ocasionando maior radiação solar e maiores valores de ET_0 .

Os valores de ET_0 são crescentes de junho (solstício de inverno) para dezembro (solstício de verão), passando pelo equinócio de primavera (setembro), e decrescentes de janeiro para junho, passando pelo equinócio de outono (março).

4.4 Distribuição espacial da radiação solar incidente na superfície (R_s), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento nos meses com valores extremos

Foram gerados mapas apresentando os comportamentos espaciais da radiação solar incidente (R_s), da umidade relativa do ar (UR) e da velocidade do vento para todos os meses do ano. Porém, para simplificar os resultados, serão mostrados apenas os mapas dos meses em que esses elementos registraram valores extremos.

O mapa da Figura 27 demonstra o comportamento da distribuição espacial dos valores médios da radiação solar incidente (R_s) no mês de janeiro, o qual apresentou os maiores valores de R_s . O mês de janeiro também foi o mês

que apresentou os maiores valores de ET_0 para todo o estado de Minas Gerais. Comparando-se os mapas das Figuras 27 e 15, observa-se que o comportamento da distribuição espacial da radiação solar durante o mês de janeiro foi similar ao da evapotranspiração de referência no mesmo mês, ou seja, nas regiões do estado onde ocorreram os maiores valores de radiação solar também ocorreram os maiores valores de ET_0 . O mesmo ocorreu para as regiões que apresentaram os menores valores. Observa-se, no mapa da Figura 27, que os maiores valores médios de radiação solar incidente no estado de Minas Gerais ficaram numa faixa de $16,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, registrados na região sul, a $24,23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, encontrados nas regiões Noroeste e Norte do estado. Deve-se ter em mente que, quando se estuda o efeito da radiação solar na evapotranspiração, é preciso estar atento ao fato de que nem toda energia disponível que chega na Terra será usada para evaporação da água. Parte dessa energia será usada em outros processos físicos, como aquecer a atmosfera e o solo.

O comportamento da distribuição espacial dos valores médios da radiação solar incidente (R_s) no mês de junho (Figura 28) apresentou os menores valores, também correspondendo ao mês que apresentou os menores valores de ET_0 em Minas Gerais. Comparando-se os mapas das Figuras 28 e 20, observa-se que o comportamento da distribuição espacial da radiação solar durante o mês de junho foi similar ao comportamento espacial da ET_0 no mesmo mês. Observa-se também que os menores valores médios de radiação solar incidente ficaram numa faixa de $11,16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, registrados no extremo sul, a $16,88 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, encontrados nas regiões Noroeste e Norte.

Observa-se que em ambas as Figuras (27 e 28), a radiação solar apresenta uma tendência crescente partindo do sul na direção norte, fato já discutido em relação às latitudes, em que, para as menores latitudes, ocorre um aumento na radiação solar que é interceptada pela superfície.

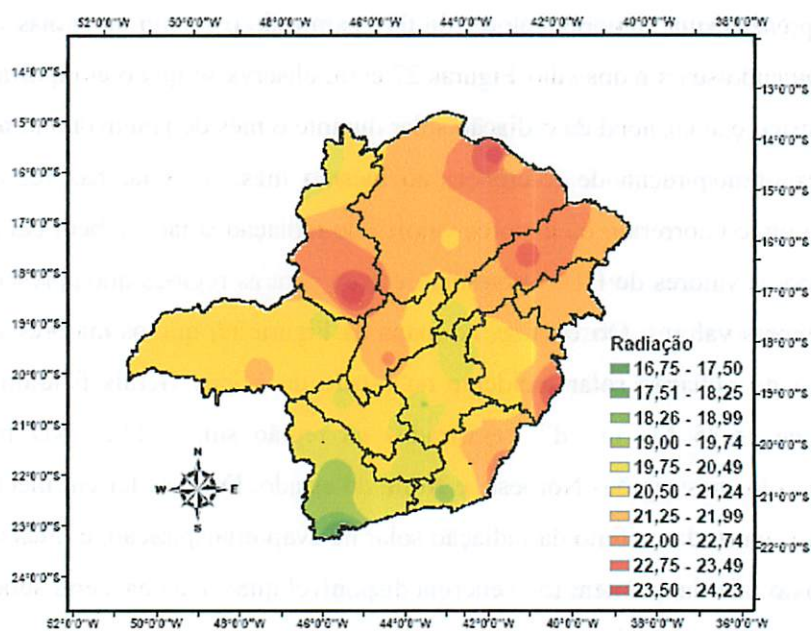


FIGURA 27 - Radiação solar média diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), no mês de janeiro.

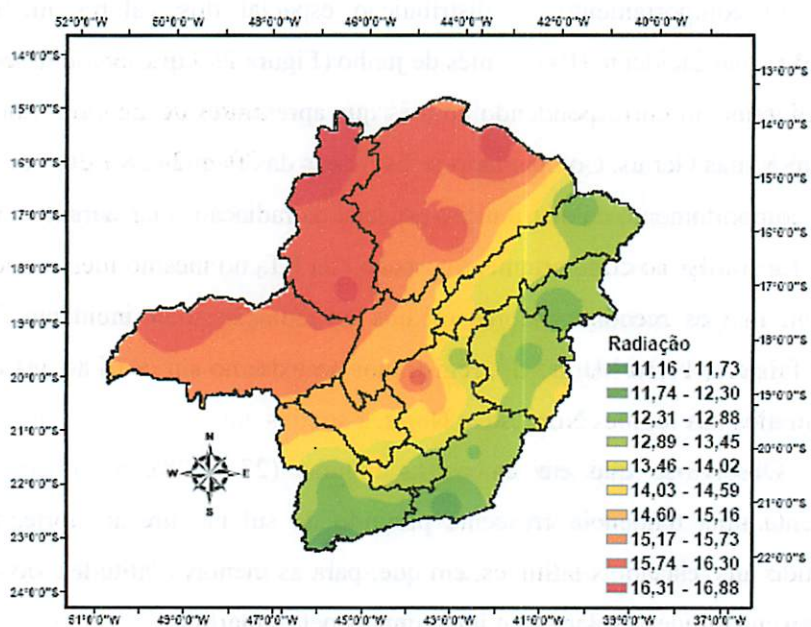
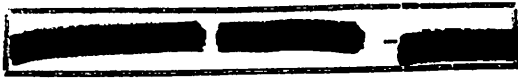


FIGURA 28 - Radiação solar média diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), no mês de junho.

No mapa da Figura 29 pode-se visualizar o comportamento da distribuição espacial dos valores médios da umidade relativa do ar (UR) no mês de agosto, o qual apresentou os menores valores, não correspondendo ao mês que apresentou os maiores valores de ET_0 para Minas Gerais, que foi janeiro. Esse fato comprova o que já foi visto anteriormente, que a UR não é um elemento climático que influencia no valor de ET_0 , como a R_s influencia. Comparando-se o mapa da Figura 29 com o da Figura 22, observa-se que, de forma geral, o comportamento da distribuição espacial da UR durante o mês de agosto foi similar ao comportamento espacial da ET_0 no mesmo mês. Só que, nas regiões do estado onde ocorreram os maiores valores de UR, ocorreram os menores valores de ET_0 , e vice-versa. Observa-se, ainda, que os menores valores médios de UR em Minas Gerais ficaram numa faixa de 45%, registrados na região norte, a 77%, encontrados na região da Zona da Mata mineira.

No mapa da Figura 30 observa-se o comportamento da distribuição espacial dos valores médios da umidade relativa do ar (UR) no mês de dezembro, o qual apresentou os maiores valores de UR, que também não correspondeu ao mês que apresentou os menores valores de ET_0 , que foi o mês de junho. Comparando-se os mapas das Figuras 30 e 26, observa-se que o comportamento da distribuição espacial da UR durante o mês de dezembro foi similar ao comportamento espacial da ET_0 no mesmo mês, só que, também nas regiões em que ocorreram os maiores valores de UR, ocorreram os menores valores de ET_0 e vice-versa. Observa-se também que os maiores valores médios de UR ficaram numa faixa de 68%, registrados no extremo norte, a 86%, encontrados em diversas regiões do estado.

Observa-se, nos mapas das Figuras 29 e 30, que a UR apresenta tendência decrescente do sul para o norte. Isto ocorre porque, à medida que diminui a latitude, as temperaturas tendem a ser maiores, salvo as condições locais de relevo, principalmente a altitude, pois, conforme cita Medeiros (2002),



a temperatura influencia fortemente a UR. À medida que a temperatura do ar decresce, normalmente ocorre um aumento na umidade relativa e queda na evapotranspiração.

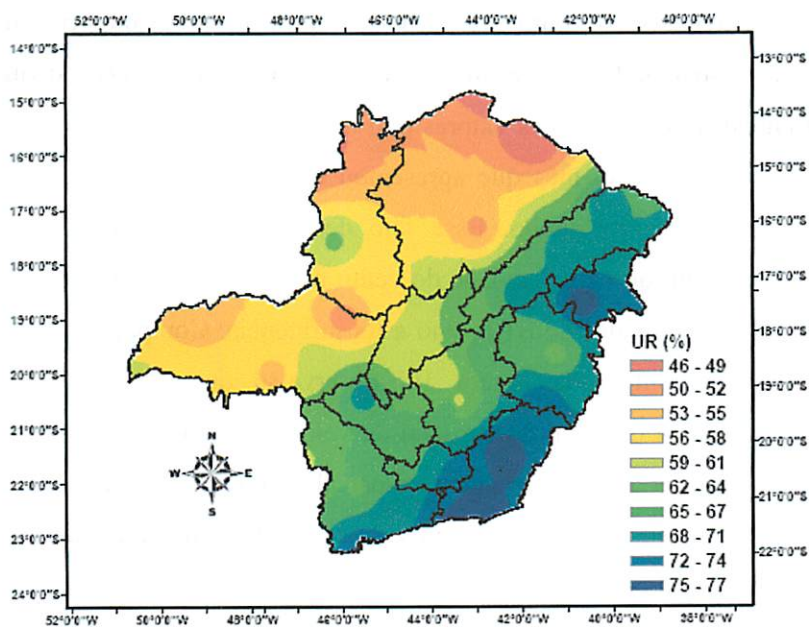


FIGURA 29 - Umidade relativa do ar (%) média, em agosto.

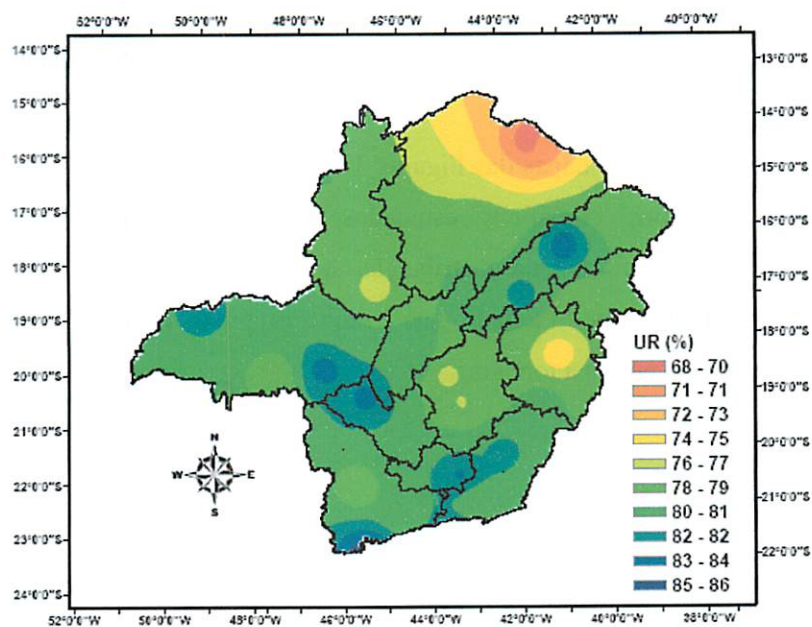


FIGURA 30 - Umidade relativa do ar (%) média, em dezembro.

No mapa da Figura 31 pode-se visualizar o comportamento da distribuição espacial dos valores médios da velocidade do vento no mês de maio, o qual apresentou os menores valores (variando entre $0,45 \text{ m s}^{-1}$ a $2,38 \text{ m s}^{-1}$), não correspondendo ao mês que apresentou os menores valores de ET_0 para Minas Gerais, que foi junho. Esse fato demonstra o que já foi discutido anteriormente, em que a velocidade do vento não é um elemento climático que influencia tanto no valor de ET_0 como a R_s influencia. Comparando-se o mapa da Figura 31 com o da Figura 19, observa-se que, de forma geral, o comportamento da distribuição espacial da velocidade do vento durante o mês de maio foi similar ao comportamento espacial da ET_0 no mesmo mês, ou seja, nas regiões do estado onde ocorreram os maiores valores de velocidade do vento também ocorreram os maiores valores de ET_0 e vice-versa.

No mapa da Figura 32, observa-se o comportamento da distribuição espacial dos valores médios da velocidade do vento no mês de setembro, o qual apresentou os maiores valores (variando entre $0,63 \text{ m s}^{-1}$ a $3,84 \text{ m s}^{-1}$), não correspondendo ao mês que apresentou os maiores valores de ET_0 , que foi o mês de janeiro.

Observa-se nos mapas das Figuras 31 e 32 que a velocidade do vento é, entre os elementos climáticos estudados, o que apresenta uma maior variabilidade espacial da sua distribuição no estado. Esse fato pode estar relacionado à topografia do Estado, que é muito irregular, visto que o fator que mais influencia o vento é a topografia.

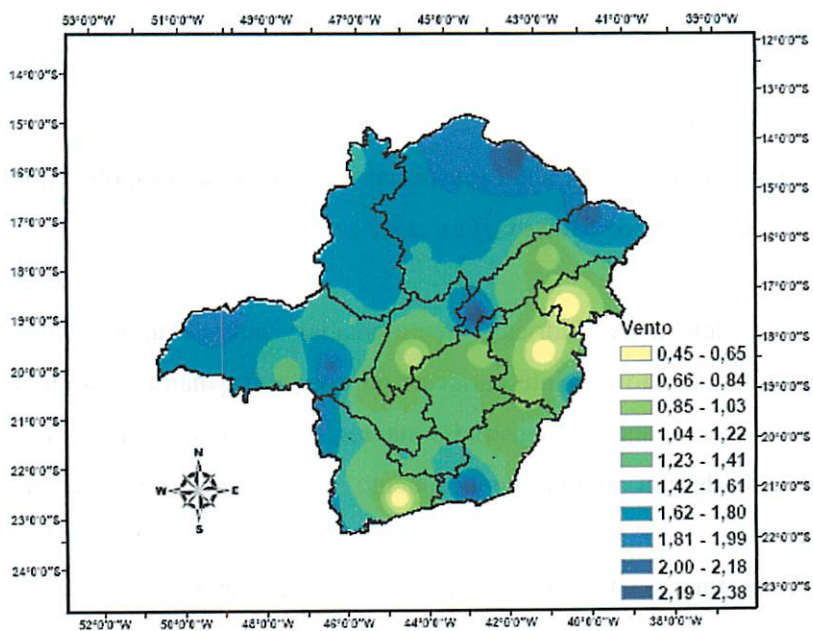


FIGURA 31 - Velocidade média do vento ($m s^{-1}$), em de maio.

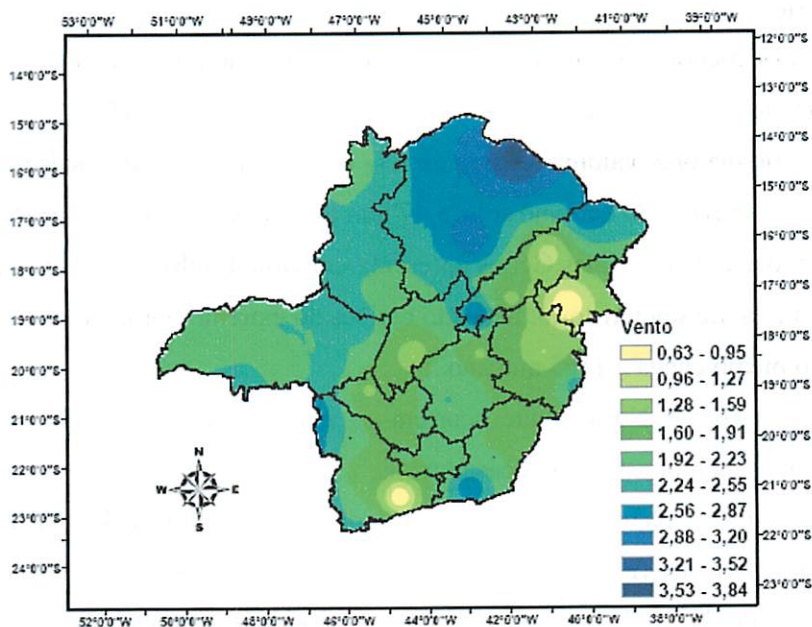


FIGURA 32 - Velocidade média do vento ($m s^{-1}$), em de setembro.

5 CONCLUSÕES

Por intermédio da análise espacial e temporal da evapotranspiração de referência no estado de Minas Gerais, pode-se concluir que:

1. as demandas hídricas, representadas pela evapotranspiração de referência (ET_0), são bastante variáveis no estado. As maiores variações, tanto espacial como temporal, registradas na região Norte do estado, mostram a necessidade de um melhor conhecimento do comportamento da ET_0 nesta região;

2. em função da nítida distinção que apresentou os dados de ET_0 geoespacializados nas mesorregiões de Minas Gerais, o conhecimento do correto valor da ET_0 para cada localidade trará benefícios aos produtores no manejo da irrigação;

3. os menores valores de ET_0 ocorrem no mês de junho, variando de 1,44 mm d^{-1} , no extremo sul a 3,61 mm d^{-1} , no extremo norte do estado;

4. os maiores valores médios de ET_0 ocorrem no mês de janeiro, ficando entre 3,51 mm d^{-1} , no extremo sul e 5,47 mm d^{-1} , no extremo norte do estado;

5. o estado de Minas Gerais apresenta um déficit hídrico em cerca de 50% da área total de seu território, havendo regiões do extremo norte em que o déficit hídrico médio chega a 1165 mm ano^{-1} ;

6. na região Norte, onde ocorrem os maiores valores de ET_0 , também ocorrem as menores precipitações pluviais;

7. entre os elementos climáticos estudados, a radiação solar incidente na superfície terrestre (R_s) se confirma como o elemento mais influente no valor da ET_0 , seguido da umidade relativa do ar e da velocidade do vento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, July/Aug. 1989.

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

ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994.

AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J. D. **Comparison of methods for estimating potential evapotranspiration**. St. Joseph: ASAE, 1992. 27 p. (ASAE. Paper, 92-2630)

AMORIM, R. S. S.; GRIEBELER, N. P.; GONÇALVES, F. A. Comparação de métodos de interpolação para espacialização de dados climáticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2003, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003. 1CD-ROM.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE MINAS GERAIS – 1988 e 1989. Belo Horizonte: Secretaria de planejamento, 1990. v. 7, 896 p.

ASSIS, F. N. Validação da equação Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência em condições brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande-PB. **Anais...** Campina Grande: SBEA, 1995. p. 63-65.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe – CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 1, p. 24-33, 2005.

BELTRAME, L. F. S.; LOUZADA, J. A. S.; LANNA, A. E. L. et al. **Evapotranspiração potencial do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 1994. 49 p. (Recursos hídricos, 31).

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normais climatológicas**. Brasília – DF, 1992. 84p.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1986. 193 p.

CALIJURI, M. L.; RÖHM, S. A. **Sistemas de informação geográfica**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1994. 34 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CHANG, J. Evapotranspiration. In: _____. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine Publishing, 1971. Cap. 13, p. 129-143.

CHUNG, H. W.; CHOI, J. Y.; BAE, S. J. Calculation of spatial distribution of potential evapotranspiration using GIS. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 1997, Minneapolis, Minnesota. **Paper...** Minneapolis, Minnesota: American Society of Agricultural Engineers, 1997. n. 973030, 9 p.

DANTAS NETO, F. S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró-RN. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, v. 7, n. 1, p. 46-55, 1999.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2. ed. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

ESRI Environmental Systems Research Institute. **Understanding GIS, the ArcInfo method**. 2005. Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>>. Acesso em: 08 jun. 2005.

EVANGELISTA, A. W. P. **Avaliação de métodos de determinação da evapotranspiração, no interior de casa de vegetação, em Lavras-MG.** 1999. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

FARIA, R. A. **Demanda de irrigação suplementar no Estado de Minas Gerais.** 1998. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FUCHS, M.; COHEN, Y.; MORESHET, S. Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management. **Irrigation Science**, New York, v. 8, n. 2, p. 91-99, 1987.

GARCIA, L. A.; GATES, T. K.; JENSEM, M. E. et al. Management support system for conjunctive irrigation and drainage. Drainage and water table control. In: **INTERNATIONAL DRAINAGE SYMPOSIUM**, 6., 1992, Nashville. **Proceedings...** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992. p. 12-19.

HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 120, n. 6, p. 1132-1139, Nov./Dec. 1994.

HASHMI, M. A.; GARCIA, L. A.; FONTANE, D. G. Spatial estimation of regional crop evapotranspiration. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 5, p. 1345-1351, Sept./Oct. 1995.

HUMAN, N. B.; MUNNIK, R.; DE MUNNIK, R. Mapping the climatic suitability of South Africa for subtropical production. **Journal of the Southern African Society for Horticultural Sciences**, Pretoria, v. 3, n. 2, p. 52-58, 1993.

HUSSEIN, A. S. A. Grass ET estimates using Penman-type equations in Central Sudan. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 125, n. 6, p. 324-329, Nov./Dec. 1999.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Senso.** 2001. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 05 jul. 2005.

INMET Instituto Nacional de Meteorologia. **Informações cadastrais das estações meteorológicas do INMET.** 2005. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sistemas/inmetWeb/produtos/climatologia/informacaoCadastralEstacao.jsp>>. Acesso em: 20 mar. 2005.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L. The role of evapotranspiration models in irrigation scheduling. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 21, n. 1, p. 82-87, 1978.

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

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. 448 p.

LA BARBERA, P.; LANZA, L.; SICCARDI, F. et al. **Hydrologically oriented GIS and application to rainfall-runoff distributed modelling: case study of the Arno basin application of geographic information systems in hydrology and water resources management**. Wallingford: Institute of Hydrology, 1993. p. 171-179. (IAHS, 211).

LAL, H.; HOOGENBOOM, G.; CALIXTE, J. P.; JONES, J. W.; BEINROTH, F. H. Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 36, n. 1, p. 175-184, Jan./Feb. 1993.

LI, S.; TARBOTON, D.; MCKEE, M. **Development of an ArcMap toolbar for regional evapotranspiration modeling**. Utah: Utah State University, 2005. Disponível em: <http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/ESRI_paper_hujun_7_03.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2005.

MAGGIOTTO, S. R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba, 1996. 71 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MATTHEWS, K. B.; MACDONALD, A.; ASPINALL, R. J. et al. Climatic soil moisture deficit: climate and soil data integration in a GIS. **Climatic – Change**, Dordrecht, v. 28, n. 3, p. 273-287, Nov. 1994.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraíba, CE**. 2002. 103 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MOHAMMAD, F. S.; AL-AMOUD, A. I. Water conservation through irrigation scheduling under arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 24, n. 4, p. 251-264, Dec. 1993.

MOORE, I. D.; GALLANT, J. C.; GUERRA, L. et al. **Modelling the spatial variability of hydrological processes using GIS**. Application of geographic information systems in hydrology and water resources management. Wallingford: Institute of Hydrology, 1993. p. 161-169. (IAHS, 211).

ORMSBY, T.; NAPOLEON, E.; BURKE, R; GROESSL, C.; FEASTER, L. **Getting to know ArcGis desktop**. Redlands, California: ESRI Press, 2001.

PARENT, P. J. **Geographic information system: evolution, academic involvement and issues arising from the proliferation of information**. 1988. Master (Thesis) - University of California, Santa Barbara.

PELLEGRINO, G. Q. **Análise espaço-temporal de dados hidrológicos da bacia do rio piracicaba**. 1995. 117 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PELLEGRINO, G. Q.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J.; BRUNINI, O. O uso de sistemas de informações geográficas no mapeamento de informações agrometeorológicas. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações Geográficas aplicações na agricultura**. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA-CPAC, 1998.

PENMAN, H. L. **Estimating Evaporation**. Trans. Amer. Geophys. Union, vol. . 37 (1), 1956.

PERDIGÃO, A.; MOITA, S. **A utilização de Sistemas de Informação Geográfica em Climatologia e Meteorologia**. 2003. Disponível em: <<http://www.ihera.min-agricultura.pt>>. Acesso em: 15 dez. 2003.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

RIBEIRO, R. S. F. **ET estimation using Penman-Monteith equation compared to ET measured by lysimetry**. Knoxville: University of Tennessee, 1996. 15 p.

SAAD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. **Freqüência de distribuição de evapotranspiração para dimensionamento de sistemas de irrigação.** In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988. Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. v. 2, p. 1037-1052.

SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos.** Brasília: ABEAS, 1996. 176 p. (Módulo 4).

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorologia convencional e automática.** 1998. 97 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

THORNTHWAITE, G. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographycal Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

VEIGA, R. D.; FERREIRA, E.; MACHADO, R. V.; ANDRADE, H.; ALVES, H. M. R. **Tratamento de dados analíticos no contexto ambiental.** Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 147 p.