



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR
MÉTODOS DIRETO E INDIRETOS E DOS
COEFICIENTES DE CULTURA DA SOJA PARA O
DISTRITO FEDERAL.**

RICARDO DE SOUSA MENDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

**BRASÍLIA/DF
MAIO/2006**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR MÉTODOS
DIRETO E INDIRETOS E DOS COEFICIENTES DE CULTURA DA
SOJA PARA O DISTRITO FEDERAL.**

RICARDO DE SOUSA MENDES

**ORIENTADORA: VÂNIA LÚCIA DIAS VASCONCELLOS
CO-ORIENTADOR: EIYTI KATO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PUBLICAÇÃO: Nº 218/2006

**BRASÍLIA/DF
MAIO/2006**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

“DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR MÉTODOS DIRETO E INDIRETOS E DOS COEFICIENTES DE CULTURA DA SOJA PARA O DISTRITO FEDERAL.”

RICARDO DE SOUSA MENDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DE GESTÃO DE SOLO E ÁGUA.

APROVADA POR:

**VÂNIA LÚCIA DIAS VASCONCELLOS, Dr^a., FAV/UnB
(ORIENTADORA) CPF: 376.764.231-04 E-mail: vdias@unb.br**

**EIYTI KATO, Dr., FAV/UnB
(CO-ORIENTADOR) CPF: 143.483.571-53 E-mail: kato@unb.br**

**CARLOS ALBERTO DA SILVA OLIVEIRA, Ph.D., FAV/UnB
(EXAMINADOR INTERNO) CPF: 244.516.067-72 E-mail: dasilva@unb.br**

**EDUARDO DELGADO ASSAD, Dr., Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para a Agricultura / Embrapa
(EXAMINADOR EXTERNO) CPF: 208225706-10 E-mail: assad@cnptia.embrapa.br**

FICHA CATALOGRÁFICA

Mendes, Ricardo de Sousa

Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indiretos e dos coeficientes de cultura da soja no Distrito Federal. / Ricardo de Sousa Mendes; orientação de Vânia Lúcia Dias Vasconcellos, Brasília, 2006.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2006.

1. Evapotranspiração. 2. Kc. 3. Soja. 4. Balanço hídrico. 5. Sonda de nêutrons.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENDES, R. S. Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indiretos e dos coeficientes de cultura para a soja no Distrito Federal. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília, 2006, 58p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ricardo de Sousa Mendes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indiretos e dos coeficientes de cultura da soja para o Distrito Federal.

GRAU: Mestre ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ricardo de Sousa Mendes

CPF: 703328191-91

QNL 30 VIA LN 31 CASA 19

CEP: 72162-331 – Taguatinga – Brasília – DF- Brasil

(61) 3475-8485 E-mail: ricardomendes@unb.br

A todos aqueles que se dedicam a investigar os fenômenos naturais, com a humildade de quem apenas em parte sabe, e, em parte, crê.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, supremo artífice, que criou todas as coisas com maestria, perfeição e graça. Que equilibrou tudo, e que nos concede a capacidade de descobrirmos aos poucos o que Ele como criador sabe por completo. A Este grande criador, que, antes que façamos a pergunta, já tem a resposta. Que governa e coordena a natureza.

À professora Vânia Lúcia Dias Vasconcellos, pela oportunidade, orientação, respeito, amizade e compreensão. Pelas lições didáticas e éticas e por ter acreditado que eu pudesse realizar este trabalho.

Ao professor Eiyti Kato, pela co-orientação no trabalho, pela ajuda e disponibilidade.

Aos meus pais, Lino Lopes e Maria Salomé, pelo total apoio. Por ousarem sonhar que um dia eu pudesse chegar até aqui. À minha família (irmãos, sobrinhos, avó, tias, tios e primos), que são a coluna sobre a qual me sustento.

À minha noiva, Juliana, pelo apoio, compreensão e carinho.

Aos meus amigos que auxiliaram nesta pesquisa, em especial aos amigos Thales Falcão e Antônio Régis. A todos os amigos e colegas do curso de Mestrado.

Ao Engenheiro Agrônomo Manuel Pereira de Oliveira Júnior, técnico da Fazenda Água Limpa, pelo precioso apoio em todas as fases do trabalho, pela disponibilidade, ajuda, companheirismo. Com ele não tem tempo ruim ou missão impossível.

Aos técnicos e funcionários da Fazenda Água Limpa, pelo precioso auxílio na instalação, manutenção e coleta de dados do experimento.

Ao pesquisador da Embrapa Cerrados, Dr. Thierry Becquer, pela gentileza de disponibilizar equipamentos e aos técnicos do Laboratório de solos, que realizaram as análises requeridas na pesquisa.

Ao professor Carlos Alberto da Silva Oliveira, da FAV/UnB, por fazer parte da banca examinadora, como examinador interno. Ao Dr. Eduardo Delgado Assad, do Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para a Agricultura, Embrapa/CNPTIA, por fazer parte da banca como examinador externo. Ao professor Jean Kleber Matos, por participar como examinador suplente.

Aos professores do curso de Mestrado em Ciências Agrárias da UnB, que me acompanharam, ensinaram e ajudaram a alcançar os meus objetivos.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade de aprender e crescer como aluno, pessoa e cidadão e concluir mais uma etapa de minha vida, no curso de mestrado.

A todos que direta ou indiretamente ajudaram na elaboração deste trabalho.

ÍNDICE

Capítulo	Página
INTRODUÇÃO GERAL	01
OBJETIVOS	07
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	07
CAPÍTULO 1	
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTURA DA SOJA PARA O DISTRITO FEDERAL.	
RESUMO	12
ABSTRACT	13
INTRODUÇÃO	14
MATERIAL E MÉTODOS	20
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO 2	
COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL.	
RESUMO	40
ABSTRACT	41
INTRODUÇÃO	42
MATERIAL E MÉTODOS	46
RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
Capítulo 1	
1. Densidade do solo da área experimental nas diferentes profundidades	20
2. Características gerais da cultivar BRS Conquista.	
3. Parâmetros da equação de condutividade hidráulica do solo na área experimental	
4. Divisão e data de ocorrência dos estádios vegetativos da soja no Distrito Federal, na safra 2004/2005.	26
5. Variáveis climatológicas e edáficas; evapotranspiração e coeficientes da cultura da soja no Distrito Federal, na safra 2004/2005.	27
6. Comparação entre os valores de coeficiente de cultura (Kc) da soja obtidos em diferentes trabalhos.	29
Capítulo 2	
1. Classificação do desempenho segundo o índice de confiança “c” de Willmott.	49
2. Comparação da Evapotranspiração da cultura (ET _c , mm) com a evapotranspiração de referência (ET ₀) medida por dois métodos indiretos no ano de 2004/2005, ao longo do ciclo da soja, no Distrito Federal.	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Capítulo 1	
1. Esquema mostrando a ocorrência e o tempo entre os diferentes estádios do ciclo da soja.	21
2. Calibração da sonda de nêutrons para solo da região Vargem Bonita, DF.	26
Capítulo 2	
1. Classificação do desempenho, pelo coeficiente “c”, dos métodos do tanque classe A (TA) e da equação de Penman (PM), com relação ao método direto da sonda de nêutrons, para a região da Vargem Bonita, DF	52

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

% - porcentagem

° C – graus Celsius

Ac – Ascensão capilar

atm – atmosfera

BH – balanço hídrico

c – fator de correção da equação de Penman

CE - Ceará

cm – centímetro

CWa – classificação climática de Köpen

CPN – Campbell Pacific Nuclear

d - coeficiente de concordância de Willmott

D - drenagem

DF – Distrito Federal

ea – pressão de saturação do vapor de água

ed – pressão de vapor de água real

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ET – evapotranspiração

ETc – evapotranspiração da cultura

ETm – evapotranspiração máxima

ETo – evapotranspiração de referência

ETo (P) – evapotranspiração de referência medida pelo método de Penman

ETo (TA) – evapotranspiração de referência medida pelo Tanque Classe A

ETp – evapotranspiração potencial

EUA – Estados Unidos da América

EV - evaporação

FAL – Fazenda Água Limpa

FAO – Food and Agriculture Organization

g/ cm³ - gramas por centímetro cúbico

GO - Goiás

ha - hectare

I – irrigação

Kc – coeficiente da cultura

km – quilômetro
km/h – quilômetro por hora
KPa - quilopascal
m - metro
 m^2 – metro quadrado
 m^3 – metro cúbico
mbar - milibar
mm - milímetros
mm/dia – milímetros por dia
MS – Mato Grosso do Sul
MT – Mato Grosso
nº - número
P – precipitação
PB - Paraíba
Plantas/ha – plantas por hectare
Plantas/m – plantas por metro
PM – Penman
PMp – ponto de murcha permanente
q – fluxo hidráulico
R – escoamento superficial
 R^2 – coeficiente de determinação
Rn – radiação líquida
RN – Rio Grande do Norte
RS – Rio Grande do Sul
S - sul
t/ha – tonelada por hectare
T – temperatura
TA – Tanque Classe A
UnB – Universidade de Brasília
 V_2 – velocidade total do vento
Vel - velocidade
w – fator de ponderação relacionado com a temperatura
W - Oeste
 ΔA – Variação de armazenamento de água no solo

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR MÉTODOS DIRETO E INDIRETOS E DOS COEFICIENTES DE CULTURA DA SOJA PARA O DISTRITO FEDERAL.

RESUMO GERAL

A disponibilidade hídrica é fator que requer planejamento detalhado e manejo intensivo na região do cerrado brasileiro, por isto as pesquisas que visam identificar e quantificar as respostas das culturas às condições ambientais são muito importantes. Assim, este estudo teve como objetivos: determinar a lâmina d' água total utilizada pela cultura da soja, bem como o coeficiente da cultura (K_c) nos diferentes estádios fenológicos; utilizar o método direto do balanço hídrico com o uso da sonda de nêutrons para o cálculo da a evapotranspiração da cultura e comparar com os métodos indiretos do tanque classe A e da equação Penman. O experimento foi implantado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL – UnB), localizada na latitude 15° 56'S e longitude 47° 56'W. O clima da área é classificado como Cwa, com duas estações bem definidas, uma seca e uma chuvosa. As variáveis meteorológicas foram monitoradas pela estação meteorológica da área experimental de agroclimatologia localizada na FAL-UnB. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. O preparo do solo foi realizado pelo sistema convencional. O plantio da soja foi feito em novembro de 2004 e um sistema de irrigação foi montado e mantido no local do experimento. O monitoramento do experimento se deu ao longo de todo o ciclo da soja, que durou até o fim de março de 2005. A cultivar de soja utilizada foi a BRS Conquista. Foram coletados os dados climatológicos, edáficos e vegetativos da cultura para verificação dos estádios de desenvolvimento. Para estimar os valores de evapotranspiração da cultura, foi realizado o balanço hídrico do solo. A umidade do solo foi medida pelo método de moderação de nêutrons. A evapotranspiração de referência foi estimada pela equação de Penman (FAO) e comparada com aquela obtida pelo método do tanque classe A. No primeiro capítulo são determinados a evapotranspiração e os coeficientes de cultura para os diferentes estádios fenológicos da soja, desde a germinação até a colheita. No segundo capítulo é feita uma comparação entre métodos de aferição de evapotranspiração, o método de Penman FAO e o do tanque classe A, visando-se estabelecer qual se relaciona melhor com o método do balanço hídrico do solo, para a cultura da soja no Distrito Federal. As principais conclusões foram: A demanda hídrica da soja foi estimada em 850 mm, alcançando o valor máximo nos estádios reprodutivos; os coeficientes de cultura da soja variaram de 0,21 a 1,56, dependendo do estágio de desenvolvimento, sendo os maiores valores obtidos nos estádios reprodutivos da

soja; segundo o índice proposto por Willmott, o método que melhor correlacionou com o método direto do balanço hídrico foi de Penman (0,84), em relação ao tanque classe A (0,70).

Palavra – Chave: 1. Evapotranspiração. 2. Kc. 3. Soja. 4. Balanço hídrico. 5. Sonda de nêutrons.

DETERMINATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION BY THE DIRECT AND INDIRECT METHODS AND THE SOYBEAN CROP COEFFICIENT (Kc) TO DISTRITO FEDERAL

ABSTRACT

The availability of water is a factor that request a detailed planning and an intensive management in Brazilian's cerrado area, therefore the research that aim to identify and qualify the crop responses, according to environmental conditions are very important. So, this study aims to determine the evapotranspiration of the soybean crop, and the crop coefficient (Kc) in different fenologics stages, using the direct water balance method with neutrons probe, beyond to check the evapotranspiration, through indirect Pan evaporation method, and the Penman equation. The research it was developed in Agua Limpa farm that belong to Brasilia University (FAL-UnB), Distrito Federal. The meteorological characteristics were checked by Agroclimatologia experimental station that is located in FAL-UnB. The studied soil is classified as Red-Yelow Latossol. The soil preparation was done in conventional system. The experiment occurred in October and the soy crop was done in November, 2004. A irrigation system was set up and the experiment was kept in the place. The experiment monitorship happened throughout soy cycle, and lasted until March, 2005. The chosen soy was BRS Conquista. Were collected information about the climatologic, pedologic and fisiologic variables for to vallue the stage of development. To calculate the evapotranspiration, it was carried out a water balance of the soil. The soil humidity was estimated by neutrons moderation method. The evapotranspiration of reference was given by Penmam equation (FAO) and it was compared to Pan evaporation method results. In the first chapter were determinated the evapotranspiration and the crop coefficient to the different soy fenologic stage, since germination to harvest. Second chapter was done a comparison between methods evapotranspiration checking, FAO Penmam method and Pan evaporation, this comparison aims to establish which one is better related, according to estimate through of the soil water balance to soy crop in Distrito Federal. The main conclusions were: The water's demand of the soybean crop was estimated in 850 mm and it reaches the maximum value in reproductive stage; the crop coefficients varied of 0,21 until 1,56, to depended on the stage; the better method used with the direct water balance method, it was Penmam method (0,84), according to Willmott indice, in relation of the pan evaporation method (0,70).

Keywords: Evapotranspiration. 2. Kc. 3.Soybean. 4. Water Balance. 5. Neutrons probe.

INTRODUÇÃO GERAL

A água é considerada um recurso natural cada vez mais escasso. Há um entendimento generalizado no meio científico, nos meios de comunicação e na sociedade em geral da importância, e acima de tudo, da escassez dos recursos hídricos, devido ao seu uso indiscriminado. Assim, há certo consenso de que, se não forem tomadas medidas mitigadoras do atual modelo de uso da água, teremos problemas sérios a médio e até mesmo a curto prazo. As avaliações dos meios científicos mostram problemas relacionados aos recursos hídricos enfrentados em diversas partes do mundo.

Em contraste com a diminuição dos recursos hídricos em geral, devido a causas diversas, como poluição, desperdício ou mau gerenciamento, a demanda mundial de água é crescente. Estima-se que, de 1900 a 1995, a demanda de água aumentou de seis a sete vezes, mais que o dobro do ritmo do crescimento demográfico medido no mesmo período. Sabe-se também que o crescimento das áreas irrigadas será responsável pela maior parcela de acréscimo de consumo deste bem nos próximos 20 anos (FREITAS & SANTOS, 1999). No Brasil, mais de 60% das derivações dos cursos d'água são para fins de irrigação (LIMA et al., 1999).

Da demanda global de água, que no ano 2000 era de aproximadamente 4000 km³ por ano, a maior parte correspondia às práticas agrícolas, principalmente à irrigação, segundo FREITAS & SANTOS, 1999, citados por FERREIRA (2000). Neste contexto, os técnicos da área agrícola têm uma responsabilidade cada vez maior, uma vez que as práticas agrícolas, principalmente a agricultura e a pecuária são responsáveis por grande parte do uso da água nestas atividades.

A disponibilidade hídrica é, então, fator que requer planejamento detalhado e manejo intensivo na região do cerrado brasileiro, por isto as pesquisas que visam identificar e quantificar as respostas da cultura às condições ambientais são muito importantes, uma vez que contribuem para o desenvolvimento de meios para minimizar os efeitos adversos do ambiente na produção agrícola, considerando-se que a água é indispensável ao desenvolvimento vegetal, sendo de relevante importância em todos os estádios vegetativos da planta (STONE & SILVEIRA, 1995).

Para identificar a necessidade hídrica da cultura, utilizam-se os valores da evapotranspiração, que é um dos parâmetros do balanço hídrico. O termo evapotranspiração é usado para descrever o processo de transferência de água para a atmosfera resultante da evaporação do solo e da transpiração dos vegetais. A mensuração de água perdida pela

superfície por evaporação e/ou transpiração é de grande importância na determinação das necessidades hídricas das culturas pois esta é a quantidade que deve ser repostada no solo pela chuva, ou por irrigação.

Os estudos de evapotranspiração voltados para a região do cerrado tiveram seu início no final da década de 70 e possuíam o objetivo de quantificar tais valores, usando a comparação de vários métodos. Foram importantes trabalhos pioneiros como os de CAMARGO (1966) e LOBATO & LOBATO (1979), realizaram trabalhos com a finalidade de determinar a evapotranspiração para fins de irrigação, utilizando e combinando os conhecimentos obtidos por PENMAN (1948).

Na região de cerrados do Distrito Federal, estudos de evapotranspiração foram realizados por DI LASCIO et al. (1994) e DI LASCIO & FERREIRA (1996), visando-se estabelecer os melhores métodos de estimativa de evapotranspiração para aquela área.

Importantes trabalhos de zoneamento agroclimático foram realizados por instituições de pesquisa do país, visando estabelecer as melhores regiões de cultivo para a cultura da soja, tanto na região Sul como na região central do Brasil. Os estudos sobre zoneamento climático para a cultura de soja, no Brasil, têm incluído como principais variáveis limitantes, a deficiência hídrica, a insuficiência térmica e a falta de uma estação seca na época da colheita (MOTA, 1983). No entanto, a precipitação pluvial foi identificada por diversos autores como a principal variável meteorológica determinante de oscilações no rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul, tanto temporal quanto geograficamente.

BERLATO et al. (1986), estudaram a demanda hídrica da soja no Sul do Brasil, obtendo a demanda hídrica da soja para aquela região. AZEVEDO et al. (1989), também a obtiveram, para as condições do Nordeste brasileiro.

FARIAS et al. (2001) realizaram um trabalho de caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil, inclusive em regiões de cerrado. MATZENAUER et al. (2003), obtiveram valores de evapotranspiração máxima ao longo de todo o ciclo da soja.

MENDES & VASCONCELLOS (2002); MENDES et al. (2004) e VASCONCELLOS et al. (2004) também utilizaram a aferição de métodos para alcançar valores reais para ajustes nas irrigações dos agricultores da região de cerrados do Distrito Federal, realizando trabalhos com diversas culturas.

Esta região tem uma importância estratégica para o desenvolvimento da agricultura e pecuária brasileiras, daí a necessidade de se realizar trabalhos nestes locais. Para a cultura da soja, seu desenvolvimento no cerrado permitiu uma contribuição crescente para a produção

nacional e determinante para a posição alcançada no cenário internacional (FREITAS & SANTOS, 1999).

Neste trabalho são utilizados os conceitos de evapotranspiração de referência (ET_o) e evapotranspiração da cultura (ET_c). Segundo DOORENBOS & KASSAM (1979), a evapotranspiração da cultura (ET_c), refere-se à perda de água por uma cultura qualquer em condições de nenhuma restrição de água em qualquer estágio de desenvolvimento sob ótimas condições agronômicas e manejo de irrigação.

Quanto à evapotranspiração de referência (ET_o), o conceito refere-se a uma cultura hipotética que se assemelha a um gramado, em crescimento ativo e mantida a uma altura uniforme de 0,12m, sombreando completamente o terreno e sem escassez de água (ALLEN et al., 1998). Representa, portanto, uma extensão da definição original de PENMAN (1948) de evapotranspiração potencial (ET_p).

Para FERREIRA (1998), a evapotranspiração é um dos principais componentes do balanço de água no solo, possuindo grande utilidade na climatologia, quer para classificações climáticas, quer para a quantificação das disponibilidades hídricas regionais através da comparação da precipitação contra a variação no teor de água no solo.

Existem métodos diretos e indiretos para o cálculo da evapotranspiração. Os métodos indiretos geralmente se baseiam em fórmulas que combinam diferentes elementos climáticos. Segundo PEREIRA et al., (1997), a evapotranspiração pode ser estimada a partir de uma série de modelos, tais como: THORNTHWAITE (1948), MONTEITH (1965), RADIAÇÃO SOLAR (DOORENBOS & PRUITT, 1977), HARGREAVES (1977), BLANEY-CRIDDLE (1977), PENMAN-MONTEITH (ALLEN et al., 1998), entre vários outros. As diferentes equações necessitam de ajustes às condições locais, pois podem apresentar em determinadas épocas do ano super ou sub estimativas, dependendo do clima da região.

Nas áreas que possuem dados de temperatura, umidade, vento e insolação ou radiação, sugere-se o emprego da equação de Penman, por proporcionar resultados satisfatórios para avaliar os efeitos do clima sobre as necessidades de água das plantas (MOREIRA, 1992). Essa equação, por apresentar maior consistência nos resultados de maneira universal, passou a ser recomendada pela FAO, caso haja disponibilidade dos dados requeridos (DOORENBOS & PRUITT, 1979).

No estudo de estimativas da evapotranspiração no Distrito Federal, observou-se que o método de Penman modificado foi o que apresentou melhores resultados, quando comparado a outros métodos de estimativa da evapotranspiração (MENDES et al., 2004). Neste trabalho

foi utilizada a equação de Penman FAO, devido à disponibilidade de dados da estação meteorológica envolvida no estudo.

O tanque classe A também é muito utilizado em todo o Brasil, devido à sua praticidade e resultados satisfatórios para o cálculo da evapotranspiração. Por meio da evaporação do tanque (EV), estima-se a evapotranspiração pela multiplicação por um coeficiente (Kp), que leva em conta o clima e o meio circundante do tanque.

Embora o uso de lisímetros seja uma ferramenta teórica muito precisa para se quantificar diretamente a evapotranspiração, a instalação e manejo deste instrumento é sempre difícil e onerosa. Muitos pesquisadores, portanto, têm recorrido a métodos de estimativa, dentre os quais, destaca-se o balanço hídrico no solo, que contabiliza a precipitação e a irrigação, em função da evapotranspiração em um volume de solo compreendido entre a superfície e a profundidade efetiva alcançada pelo sistema radicular da cultura.

O balanço hídrico utiliza o princípio geral de conservação de massa para determinar a precipitação (P), irrigação (I), escoamento superficial (R), drenagem profunda (D), ascensão capilar (A_c) variação no armazenamento (ΔA) e evapotranspiração (ET), conforme REICHARDT (1985).

Se a quantidade de água que entra em um volume de solo num período de tempo for maior que a quantidade que dele sai, haverá reposição hídrica, e se sair mais do que entrar, haverá retirada. O saldo de água no solo é obtido pela variação no armazenamento de água do perfil. A água pode sair deste sistema pelos processos de drenagem profunda, evapotranspiração e escoamento superficial. A drenagem profunda representa a perda de água para fora da zona radicular através do limite inferior do volume de solo considerado. O movimento ascendente da água no solo que se dá em determinadas condições constitui a ascensão capilar. Para o propósito de obtenção da evapotranspiração, os detalhamentos de estudo de P, I e R são de medida relativamente fácil, em relação à ΔA , D e A_c .

A precisão do método do balanço hídrico no solo depende de como são medidos os componentes da equação de conservação da água. Um método muito recomendado para a determinação do teor de água do solo, devido a sua precisão, é a sonda de nêutrons, que é baseada no princípio de que o hidrogênio é mais efetivo do que qualquer outro elemento para diminuir a velocidade dos nêutrons rápidos e que a maior parte dos núcleos de hidrogênio presentes no solo são encontrados na molécula de água. Os nêutrons rápidos irradiados dentro do solo são absorvidos pelo hidrogênio e então são refletidos de volta ao detector como nêutrons lentos (ROSENBERG et al., 1983).

A contagem de nêutrons lentos é uma medida indireta do teor de água do solo. O método de dispersão de nêutrons é considerado de grande precisão quando comparado a outros métodos. As medidas podem ser tomadas repetidamente, no mesmo lugar, sem perturbar o solo, fator este de grande importância quando comparado a outros métodos (MOTA, 1989). Segundo GOMIDE (2001), a equação de calibração interna da sonda de nêutrons fornecida pelo fabricante pode ser considerada adequada para muitos casos. Porém, recomenda-se verificar a calibração do equipamento através do teor de água com base na massa do solo a ser manejado. Em caso de grande diferença entre o valor real e estimado, sugere-se a calibração do aparelho em campo ou laboratório.

Para se relacionar a necessidade de água de um determinado cultivo com suas características de crescimento, é bastante utilizado um coeficiente obtido pela relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência: o coeficiente da cultura (K_c), sugerido por DOORENBOS & PRUITT (1977). De acordo com CARRIJO & OLIVEIRA (1997), o K_c faz a integração entre três características que diferenciam a evapotranspiração da cultura daquela utilizada como referência, que são: a altura da planta ou estágio de desenvolvimento; a resistência e o albedo da superfície solo-cultura considerada.

A distribuição do coeficiente da cultura (K_c) durante o ciclo produtivo, é chamada de “curva da cultura”, que é obtida experimentalmente, e representa o efeito integrado da mudança na área da folha, da altura da planta, do grau de cobertura, da resistência do dossel da planta e do albedo sobre a E_{Tc} em relação a E_{To} . A estimativa da E_{Tc} é obtida pela multiplicação da E_{To} pelo K_c (SEDIYAMA, 1996).

A cultura da soja foi selecionada para este trabalho devido à sua grande importância para a região e pelo alto potencial de consumo hídrico verificado na produção de larga escala. Ela é a mais importante oleaginosa cultivada no mundo. Da produção mundial total das sete principais oleaginosas, a soja teve participação com 52%, ou seja, 156 milhões de toneladas em 1999 (ROESSING & GUEDES, 2000), número crescente desde então.

A soja apresenta basicamente exigências nutricionais, térmicas, hídricas e fotoperiódicas. Com relação às exigências hídricas, precipitações anuais entre 450 e 800 mm, bem distribuídas durante o ciclo, são suficientes para um bom desenvolvimento da cultura, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo. Os períodos mais críticos quanto à exigência hídrica são: a implantação da lavoura, o florescimento e o enchimento de grãos. Para a germinação, é necessário que a semente absorva pelo menos 50% do seu peso em água, por isto o teor de água do solo deve ser adequada na época do plantio (ARANTES & MIRANDA, 2000).

A sensibilidade ao fotoperíodo é característica variável entre as cultivares, sendo que cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, abaixo do qual é induzido o processo de florescimento. Em função dessa característica, a faixa de adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se direciona ao norte ou ao sul (ARANTES & MIRANDA, 2000).

A aceleração do processo de expansão da cultura da soja na região dos cerrados pode ser atribuída, entre diversos fatores, à rusticidade da cultura, aos programas oficiais de desenvolvimento e ao esforço da pesquisa agropecuária de diversas instituições, principalmente a Embrapa, para geração de tecnologia e diminuição de riscos e obstáculos ao desenvolvimento sustentável da cultura. Estes esforços têm garantido produção e produtividade crescentes e aumentado a significativa participação na produção brasileira, configurando o Brasil como um dos maiores exportadores mundiais de soja, gerando divisas e desenvolvimento. Porém deve-se levar em consideração o elevado consumo de água da cultura e sua relação com a disponibilidade hídrica local ou mesmo com a distribuição espacial das chuvas na região, visando-se um planejamento racional.

Conhecendo-se o consumo de água da soja durante os diversos estádios de crescimento, tem-se uma base mais confiável para planejar a lavoura e até mesmo sobre a necessidade de irrigação suplementar, de maneira que não haja falta ou mesmo excessos que se traduzam em desperdício de água.

No primeiro capítulo, são determinados a evapotranspiração e os coeficientes da cultura para os diferentes estádios fenológicos da soja, desde a germinação até à colheita. Estes conhecimentos permitirão um melhor planejamento de riscos climáticos inerentes à cultura, ou mesmo à prática de irrigação suplementar em algum destes estádios, o que pode ser viável no caso de produtores de sementes.

No segundo capítulo é feita uma comparação entre dois métodos de aferição da evapotranspiração, o método de Penman FAO e do tanque classe A com o método direto do balanço hídrico do solo, para a cultura da soja, na região do Distrito Federal.

O estudo do balanço hídrico e determinação dos coeficientes de cultura para a cultura da soja no Distrito Federal podem contribuir para uma otimização nos meios de produção da cultura e conseqüente prevenção contra variações climáticas que resultem em deficiência ou excesso hídrico. Concomitantemente, contribui para o uso sustentável da água na região do cerrado.

OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivos:

- Determinar a evapotranspiração da cultura ou demanda hídrica total da soja;
- Determinar os coeficientes da cultura (K_c) para a soja em cada estágio fenológico;
- Comparar o método direto do balanço hídrico do solo com os métodos indiretos do tanque classe A e da equação de Penman;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 330 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARANTES, N.E. e MIRANDA, M.A.C. **Cultura da soja no cerrado**. Editado por Neylson Arantes e Plínio Itamar de M. Souza. Capítulo VII, p. 209-224. Piracicaba: POTAFOS, 2000.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 22, n.2, p.243-259, 1986.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W.D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigatio data**. Washington: USDA, 1977. 48 p.

CAMARGO, A.P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, Boletim n.161, p. 1-51, 1966.

CARRIJO, O. A.; OLIVEIRA, C. A. S. Irrigação de hortaliças em solos cultivados sob proteção de plástico. Brasília: Embrapa Hortaliças, 1997. 20 p. (**Circular Técnica**, 10).

DI LASCIO, V. L., FERREIRA, R. S. A.; PRAÇA, L. B. Avaliação da Evapotranspiração das Culturas do Feijão (*Phaseolus vulgaris*) e Ervilha (*Pisum sativum* L) Irrigadas no Centro Oeste Brasileiro. VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...**, p. 766 – 769. Belo Horizonte, 1994.

DI LASCIO, V. L.; FERREIRA, R. S. A. **Avaliação dos coeficientes culturais (Kc) do feijão, aveia e ervilha na região do Distrito Federal.** IX Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais, p. 428-431. Campos do Jordão, 1996.

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

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

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Las necesidades de água de los cultivos.** Roma: FAO, 1979.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p. 415-421, 2001.

FERREIRA, A.L.A. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) em Cruz das Almas, BA.** Cruz das Almas: UFBA, 1998. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia, 1998.

FERREIRA, R.S.A. **Determinação de coeficientes de cultura para o feijoeiro e otimização econômica da produção em função de lâminas de água, na região do Distrito Federal.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2000, 61p. Dissertação de Mestrado.

FREITAS, M.A.; SANTOS, A.H.M. Importância da água e da informação hidrológica. In: **O Estado das águas no Brasil – 1999**, organização Freitas, M.A.V. – Brasília, ANEEL (SIH), MMA, SRH, 339p. 1999.

GOMIDE, R.L. Importância da automação nos sistemas agrícolas irrigados, visando a irrigação inteligente e a agricultura de precisão. In: WORKSHOP SOBRE APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE TDR (REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO) NA AGRICULTURA, Campinas, 2001. **Aplicações da técnica de TDR na agricultura**. Campinas: UNICAMP; FEAGRI, 2001. p. 1-36.

HARGREAVES, G.H. **Water requirements manual for irrigated crops and rainfed agriculture**. Logan: Utah State University, 1977. 41 p.

LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. O Uso da Irrigação no Brasil. In: **O Estado das águas no Brasil – 1999**, organizações Freitas, M.A.V. – Brasília, ANEEL, SIH: MMA, SRH, 339p. 1999.

LOBATO, O. J. DA S., LOBATO, E. J. V. **Considerações sobre a Evapotranspiração Potencial Medida e calculada no Município de Goiânia e Circunvizinhos**. Anais da Escola de Agronomia e Veterinária, Goiânia, v.9, n.1, p. 50 – 73, 1979.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.6, p. 1013-1019, 2003.

MENDES, R.S.; VASCONCELLOS, V.L.D. Estudo da evapotranspiração de referência para a região do Distrito Federal. In: Congresso de Iniciação Científica da UnB, 7, 2002, Brasília – DF. **Anais...**, 25p.

MENDES, R.S.; VASCONCELLOS, V.L.D.; D'ANGIOLELLA, G.L.B; FALCÃO, T.C.C. Avaliação de métodos para o cálculo da evapotranspiração de referência no núcleo rural da Vargem Bonita, Distrito Federal. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004. Fortaleza Meteorologia e Desenvolvimento sustentável, 2004. **CD-Rom**.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environmental the state and movement of water in living organisms. In: SYMPOSIUM SOCIETY EXPERIMENTAL BIOLOGY, n. 19, 1965, **Proceedings**, New York: Academic Press, 1965. p. 205-234.

MOREIRA, H. J. C. **Manual Prático para o manejo da Irrigação**. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação – SENIR, Projeto BRA/87/008 – PNUD/OMN. Brasília, 86 p., 1992.

MOTA, F.S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: VERNETTI, F. (Coordenador). **Soja**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 463p.

MOTA, F.S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo, 1989. Nobel. 376 p.

PENMAN, H.L. Natural Evaporation From Open Water, Bare Soil, and Grass. **Proceedings of Royal Society**, London, n. A-123, p. 120-145, 1948.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.

ROESSING, A.C.; GUEDES, L.C.A, **Cultura da soja no cerrado**. Editado por Neylson Arantes e Plínio Itamar de M. Souza. Capítulo I, págs.1-51. Piracicaba: POTAFOS, 2000.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: Jon Wiley & Sons, 1983.495p.

SEDIYAMA, G. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1996.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. EMBRAPA, CNPAF. Goiânia. 49 p. 1995.

THORTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification fo climate. **Geographical Review**, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.

VASCONCELLOS, V.L.D.; SERRA, D.D.; FERREIRA, R.S.A.; D'ANGIOLELLA, G.L.B. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004. Fortaleza Meteorologia e Desenvolvimento sustentável, 2004. **CD-Rom**.

CAPÍTULO 1

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL.

Trabalho enviado para publicação na Revista Brasileira de
Agrometeorologia – RBA.

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL.

RESUMO

A cultura da soja ocupa posição de destaque na economia brasileira, o que justifica a busca de novas informações no sentido de aprimorar as condições de cultivo e reduzir os riscos de prejuízos. Uma das principais causas da variação de produtividade da soja no Brasil tem sido a ocorrência de deficiência hídrica. O estudo do balanço hídrico e determinação dos coeficientes da cultura para a soja no Distrito Federal podem contribuir para uma otimização nos meios de produção e conseqüente prevenção de deficiência ou excesso hídrico. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração e os coeficientes da cultura para a soja no Distrito Federal, uma região predominantemente de cerrado. O experimento foi implantado na Fazenda Água limpa da Universidade de Brasília FAL - UnB, localizada entre a latitude 15° 56'S e longitude 47° 56'W. No local de execução do experimento, o solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, bem drenado, profundo e ocupando um relevo plano. A cultivar adotada foi a BRS Conquista, desenvolvida na Embrapa Cerrados. O experimento foi implantado no mês de outubro e o plantio da soja foi feito em novembro de 2004. Para calcular os valores de evapotranspiração, foi realizado o balanço hídrico do solo. A evapotranspiração de referência foi dada pela equação de Penman (FAO). As principais conclusões foram: A demanda hídrica da soja foi de 850mm ao longo de todo o ciclo, alcançando o valor máximo nos estádios reprodutivos; os coeficientes de cultura da soja variaram de 0,21 a 1,56, dependendo do estágio de desenvolvimento, sendo os maiores valores obtidos nos estádios reprodutivos da soja. Os valores de Kc encontrados acompanharam os resultados descritos na literatura sobre o assunto.

Palavra – Chave: 1. Evapotranspiração. 2. Kc. 3. Soja. 4. Balanço hídrico. 5. Sonda de nêutrons

DETERMINATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION AND THE SOYBEAN CROP COEFFICIENT IN TO DISTRITO FEDERAL

ABSTRACT

The soybean crop takes up a high place in Brazilian economy. This justify the search for new informations that can help in its cultivation and to reduce its risks of loss. The main cause of soy productive variation in Brazil it is water shortage. Researches that aim to identify and qualify the crop responses to environmental conditions are very important, and they can contribute to development of resources that can reduce unfavorable effects of environment on agricultural production. The water balance study and the determination of crop coefficient to soy in Distrito Federal can help to improve the production resources and prevent the shortage or excess of water. The experiment was introduced in Agua Limpa farm that belong to Brasilia University -FAL-UNB, Distrito Federal. The geographic coordinate are 15 °56' S of Latitude and 47° 56 W of Longitude. The local where occurred the experiment the soil is classified as vermelho amarelo latossolo, it has a good drainage, a flat relief, and it is deep. The adopted cultivation was BRS Conquista, tha was developed by Embrapa Cerrados. The soy plantation was done in November 2004. To calculated the evapotranspiration values was carried out the soil water balance. The evapotranspiracao reference was given by Penmam equation (FAO). The main conclusions were: The effective blade or the sufficient blade were used to keep the favorable soil conditions to cultivation stayed in 850mm. The demanded water to soy crop is increased throughout cycle and it reaches the maximum value in reproductive stage; the crop coefficients varied of 0,21 until 1,56, to depended on the stage. In general, the Kc value observed the evolution of described results in the literature about them.

Keywords: Evapotranspiration. 2. Kc. 3.Soybean. 4. Water Balance. 5. Neutrons probe.

INTRODUÇÃO

A cultura da soja ocupa posição de destaque na economia brasileira, o que justifica a busca de novas informações no sentido de melhorar as condições de cultivo e reduzir os riscos de prejuízos. Dentre todos os fatores envolvidos na produção agrícola, o clima apresenta-se como um dos fatores de maior interferência. Os efeitos da ocorrência de certas adversidades climáticas, como geadas e secas, podem em alguns casos, ser total ou parcialmente amenizados, desde que possam ser conhecidos e manejados.

Uma das principais causas da variação de produtividade da soja no Brasil tem sido a ocorrência de deficiência hídrica. Em relatório sobre seguro agrícola elaborado pelo Ministério do Planejamento (GÖPFERT et al., 1993, citado por FARIAS et al., 2001), consta a ocorrência de secas como principal evento sinistrante no cultivo da soja (responsável por 71% dos casos), seguida por chuva excessiva (22%), granizo e geada. Em menor escala aparecem vento forte, tromba d'água, variação excessiva de temperatura e enchente, além de pragas e doenças.

A necessidade de água na soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos, decrescendo após esse período. De acordo com FARIAS et al. (2001), o consumo de água pela cultura da soja depende, além do estágio de desenvolvimento, da demanda evaporativa da atmosfera, o que pode levar a uma variação em seu valor absoluto, em função de fatores geográficos (local) e de tempo (ano, época de semeadura).

As pesquisas que visam identificar e quantificar as respostas da cultura às condições ambientais são muito importantes, uma vez que contribuem para o desenvolvimento de meios para minimizar os efeitos adversos do ambiente na produção agrícola. Dos elementos climáticos, a temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade hídrica são os que mais afetam o desenvolvimento e a produtividade da soja, segundo ARANTES & MIRANDA (2000).

Os impactos das adversidades climáticas, especialmente de anomalias negativas da precipitação, sobre a produção brasileira de soja, tornaram-se largamente conhecidos em função da magnitude de suas conseqüências econômicas, segundo relatam QUEIROZ et al. (1996). Para estes autores, o desenvolvimento de tecnologias ou a adoção de medidas práticas, no campo agrícola ou econômico, para minimizar os efeitos deletérios da produção, depende do entendimento e da quantificação do efeito da disponibilidade hídrica sobre o rendimento, em cada estágio da cultura.

Soja e milho são culturas predominantemente cultivadas em condições de sequeiro, ou seja, sem suplementação hídrica por irrigação, o que determina grande variabilidade interanual da produção dessas culturas (FONTANA et. al., 2001). Neste contexto, diversos trabalhos têm demonstrado a alta correlação entre as condições meteorológicas durante o período de crescimento e de desenvolvimento das culturas e a produção agrícola (BERLATO et al., 1992; MATZENAUER et al., 1995).

Dentre os componentes limitantes, o déficit hídrico é aquele que afeta a produção agrícola com maior frequência e intensidade (FONTANA et. al., 2001). É amplamente conhecido, ainda, que os efeitos do déficit hídrico dependem da sua intensidade, duração, época de ocorrência e da interação com outros fatores determinantes da expressão do rendimento final (CUNHA & BERGAMASCHI, 1992).

O déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, diminuindo a fotossíntese pela redução da área foliar e afetando vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas (FONTANA et al., 1992).

O estudo do balanço hídrico e a determinação dos coeficientes da cultura para a soja no Distrito Federal podem contribuir para uma otimização nos meios de produção e conseqüente prevenção de deficiência ou excesso hídrico. Além disso, contribui para o uso sustentável da água pela agricultura, o que denota qualidade ambiental.

A observação das variáveis meteorológicas e edáficas, além de permitir o entendimento de elementos fundamentais de controle da resposta da planta e a determinação dos estádios críticos para o atendimento das exigências hídricas, fornece informações úteis para a previsão e comercialização da safra, bem como para a tomada de decisão referente ao manejo da cultura (QUEIROZ et al., 1996).

Diversos autores (JENSEN, 1968; BERLATO, 1987; MEDEIROS et al., 1991; MATZENAUER et al., 1995) têm proposto o uso de modelos de previsão de rendimento, tendo como variável independente alguma expressão da disponibilidade hídrica.

Os estudos com relação à demanda hídrica da soja iniciaram-se a algumas décadas. Em pesquisas realizadas no âmbito internacional, pode-se citar: GRISSON et al. (1955), que obtiveram um aumento de 390 kg/ha, em relação à parcela não irrigada, quando aplicaram irrigação após a extração de 25% da água disponível do solo, durante o desenvolvimento das sementes.

RUNGE & ODELL (1960), trabalhando em Illinois, EUA, mostraram que o rendimento está positivamente correlacionado com a precipitação que ocorre no período de

enchimento dos grãos. SHAW & LAING (1966) concluíram que a redução máxima do número de vagens por planta ocorreu durante a última semana de desenvolvimento das vagens e durante a formação dos grãos, em consequência da deficiência hídrica. Quando a deficiência ocorreu durante a floração e o início da formação das vagens, houve aborto de flores e queda de vagens. A deficiência hídrica ocorrida durante a formação de grãos reduziu o tamanho da semente.

HOWEL (1967), encontrou uma correlação positiva do teor de umidade do solo com a altura de planta, número de nós, diâmetro do caule, número de flores, número e peso de sementes.

ROGERS (1971), verificou, na Carolina do Sul, EUA, que o período de enchimento dos grãos de soja é um período crítico em relação à água, ao determinar a associação entre rendimento e disponibilidade hídrica nesta fase. BUNTLEY et al. (1973), trabalhando em três localidades do Tennessee, EUA, verificaram que as maiores reduções de rendimento ocorreram sempre que a precipitação era menor que a evapotranspiração potencial, durante toda a extensão ou parte do período de enchimento de grãos.

DOSS & THURLOW (1974), apontam que muitos fatores são importantes na produção de soja e que a falta de água, em períodos críticos de crescimento, aparenta ser um dos mais freqüentes fatores limitantes.

DOSS et al. (1974) e SIONIT & KRAMER (1977) obtiveram significativa redução do rendimento da soja quando impuseram deficiência hídrica durante o período de enchimento de grãos.

No Brasil, estudos realizados por BERLATO & GONÇALVES (1978) também determinaram uma correlação altamente significativa entre o índice de precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ETp) e o rendimento de uma cultivar tardia de soja, referente ao período de enchimento de grãos. Rendimentos acima da média foram obtidos quando a relação P/ETp, no período crítico de enchimento de grãos foi de 1,6, ou seja, quando a precipitação excedeu a evapotranspiração em cerca de 60%.

BERLATO & BERGAMASHI (1979), determinando o consumo estacional de água pela cultura da soja, no Rio Grande do Sul, obtiveram um consumo médio diário de 5,8 mm, no caso da cultivar Bragg. Este consumo, expresso pela evapotranspiração diária, variou desde 2,2 mm no subperíodo plantio-emergência, até o valor máximo de 7,4 mm, atingido no subperíodo compreendido entre o início do florescimento e o máximo surgimento de vagens. Estes mesmos autores, estudando a relação entre a evapotranspiração da cultura da soja e a evaporação medida em tanque de evaporação classe A, observaram que os valores máximos

ocorreram durante a formação de vagens e grãos de soja. Quando ocorreram condições desfavoráveis, com precipitação menor que a evapotranspiração no início do florescimento, não se obteve redução significativa do rendimento.

No Estado do Rio Grande do Sul, quando a precipitação é suficiente para a demanda da soja no período reprodutivo, não se tem obtido efeito significativo da irrigação sobre o rendimento (BERGAMASHI, 1973; SANTOS FILHO, 1975; PORTO, 1975; BERGAMASHI & BERLATO, 1974a; RASSINI, 1980).

Em condições de estiagem, principalmente nos períodos críticos do ciclo, tem-se relatado efeitos positivos da irrigação sobre o rendimento da soja (MORAES JUNIOR, 1971; BERGAMASHI & BERLATO, 1974b; BERGAMASHI et al. 1976, ZANETTI & OLIVEIRA, 1979).

A necessidade hídrica da soja, para obter uma produtividade alta, varia de 450 a 850 mm por ciclo, dependendo do clima e da duração do período de crescimento, segundo DOORENBOS & KASSAN (1979).

A irrigação, após a semeadura da soja, pode proporcionar um índice de emergência satisfatório, melhorando a produtividade. No entanto, de maneira geral, o efeito da suplementação de água pareceu maior sobre outros três componentes, que são o número de vagens por planta, número de sementes por vagem e peso das sementes (MOMEN et al., 1979).

Os estudos sobre zoneamento climático para a cultura de soja, no Brasil, têm incluído como principais variáveis limitantes, a deficiência hídrica, a insuficiência térmica e a falta de uma estação seca na época da colheita (MOTA, 1983). No entanto, a precipitação pluvial foi identificada por diversos autores (MOTA, 1983; CUNHA et al., 1999; BARNI & MATZENAUER, 2000), como a principal variável meteorológica determinante de oscilações no rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul, tanto temporal quanto geograficamente.

Para a região Sul do Brasil, BERLATO et al. (1986), obtiveram valores médios de evapotranspiração máxima (ET_m) em torno de seis mm/dia. O menor consumo foi verificado no início do ciclo, enquanto que o maior consumo ocorreu do início do enchimento dos grãos.

BERLATO (1987) parametrizou e validou, para a cultura da soja em condições de parcelas experimentais, no Rio Grande do Sul, o modelo multiplicativo de JENSEN (1968), modificado para a estimativa do rendimento de grãos a partir do consumo relativo de água. Nesse modelo, são atribuídos pesos diferentes aos estádios de desenvolvimento da cultura, de acordo com a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico. O autor obteve bom ajuste,

com coeficientes de determinação variando de 0,83 a 0,87, tendo o período reprodutivo como o de maior sensibilidade e que, portanto, assume maior peso.

Os excessos hídricos também podem modificar o rendimento da soja de formas variáveis: se ocorrerem associados a altas temperaturas e drenagem livre, resultam em elevados rendimentos, como foi observado nos meses de dezembro e janeiro na região norte do Paraná. Se a drenagem for insuficiente, a aeração do solo fica reduzida e os rendimentos diminuem (FARIAS et al., 1997).

O elevado uso de tecnologia no cultivo da soja no Cerrado torna o Brasil competitivo internacionalmente. O desempenho da cultura da soja no Cerrado mostra-se superior ao obtido no Sul do Brasil e em outras partes do mundo (SOUZA et al., 1997).

Diversos pesquisadores realizaram estudos de balanço hídrico no solo para a determinação da ETc e do Kc, visando sua aplicabilidade nos cálculos da lâmina de água necessária às culturas (ÁVILA NETO, 1997; LOPES, 1999; RAMOS, 2001). No entanto, a aplicabilidade desses coeficientes é restrita para as condições climáticas e culturais para os quais foram determinados, havendo necessidade de calibração para sua utilização em locais diferentes (ALLEN et al., 1998).

Alguns autores associaram a ocorrência de deficiência hídrica em algum estágio de desenvolvimento da soja com a redução do rendimento de grãos, já que o déficit hídrico afeta diversas funções da planta (CONFALONE et al., 1998; NEUMAIER et al., 2000).

BEZERRA & OLIVEIRA (1999) determinaram a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo para o milho em Fortaleza – CE através do balanço hídrico no solo e o método de Penman – Monteith – FAO para obtenção da evapotranspiração de referência.

MATZENAUER (1999), apresenta médias da evapotranspiração da cultura da soja no Rio Grande do Sul de 2,7 mm diários para o período de estabelecimento da cultura; 7,5 mm/dia, em média, do início da floração ao início do enchimento dos grãos e 5,7 mm/dia no final do ciclo. Considerando todo o ciclo, este autor descreve o valor de ETm total de 827,2 mm, com média diária de 6,1 mm/dia.

Segundo CUNHA et al. (2001), algumas técnicas de manejo são capazes de minimizar os efeitos deletérios do déficit hídrico na cultura da soja. Entre eles estão a escolha da cultivar, a época de semeadura, o plantio direto, a irrigação, o menor espaçamento entre linhas, entre outros. O zoneamento de riscos agroclimáticos também deve rigorosamente observado (NEUMAIER et al., 2000, citado por CUNHA et al., 2001).

Estudos recentes, realizados por JUNIOR & GOBBI (2003), analisaram a interação superfície-atmosfera para a estimativa de evapotranspiração da cultura da soja no estado do

Paraná. SCHACKER & MATZENAUER (2003), também estudaram a disponibilidade hídrica para a cultura da soja e sua relação com fenômenos climáticos no Rio Grande do Sul, concluindo que a cultura da soja apresenta uma resposta diferencial à deficiência hídrica, dependendo do estágio de desenvolvimento em que se encontra.

Ainda é discutível a adoção da prática de irrigação para a cultura soja, considerando-se fatores ambientais, sanitários e econômicos. Em casos específicos como a complementação em épocas de veranico, ou para a produção de sementes de qualidade na época de estiagem já existem áreas de cultivo onde se pratica a irrigação. Há ainda que se resolver questões ambientais, como a dependência do fotoperíodo entre as cultivares clássicas. Porém, com novas cultivares sendo lançadas no mercado, espera-se que a barreira relacionada ao fotoperiodismo seja solucionado e a soja passe a ser cultivada também em épocas de seca no cerrado, utilizando-se irrigação, que permite maior controle da umidade e conseqüentemente de doenças, como a ferrugem asiática, que é um dos fatores sanitários limitantes. A seleção de cultivares adaptadas às latitudes tropicais tem sido possível mediante a transferência de genes para período juvenil longo (KIIHL & Garcia, 1989; SPEHAR, 1994).

Por fim, e talvez o mais importante são os fatores econômicos. Como a irrigação é uma prática cara, provavelmente só será viável em extensões de terra menores e para nichos específicos de mercado, como produção de sementes ou soja orgânica, que tem alto valor agregado. FRANKE & DORFMAN (1998) afirmam que a performance econômica da agricultura irrigada é inversamente proporcional ao comportamento da lâmina de irrigação suplementar necessária, ou seja, quanto maior for a lâmina, menores são as receitas líquidas obtidas. Isto revela a importância de se quantificar a água necessária para a cultura e desta forma economizar na irrigação.

A determinação das necessidades hídricas reais da soja em cada estágio de desenvolvimento pode contribuir para o planejamento da produção e para a diminuição das perdas devido ao déficit ou excesso hídrico, visando-se maximizar a eficiência da produção, evitando, ao mesmo tempo, que haja desperdício dos recursos hídricos.

Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração e os coeficientes da cultura para a soja no Distrito Federal, uma região predominantemente de cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento que serviu de base para este estudo foi implantado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília FAL - UnB, localizada na região do Núcleo Rural da Vargem Bonita, cujas coordenadas geográficas estão entre a latitude 15° 56'S e longitude 47° 56'W, a uma altitude de 1080m.

No Distrito Federal, conforme a classificação climática de Köppen, apresentada pelo ATLAS DO DISTRITO FEDERAL (1984), ocorre o tipo climático Cwa, caracterizado pela ocorrência de duas estações bem definidas: a seca, com início em abril e que prossegue até meados de setembro e uma estação chuvosa correspondente ao restante do ano.

As variáveis meteorológicas observadas durante o período de condução do ensaio foram monitoradas pela estação meteorológica da área experimental de agroclimatologia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, localizada na FAL-UnB, próxima ao experimento. Os dados coletados pela estação agroclimatológica formam uma série histórica de dados que permite utilizar com segurança as variáveis meteorológicas requeridas neste estudo.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, bem drenado, profundo e ocupando um relevo plano. Foram realizadas determinações físicas, químicas e hídricas do solo, pelo Laboratório de Física do Solo da Embrapa Cerrados. As densidades do solo para as diferentes profundidades constam na Tabela 1.

Tabela 1 – Densidade do solo da área experimental nas diferentes profundidades

Profundidade (cm)	Densidade (g/cm ³)	
	Partícula	Solo
00-20	2,76	0,98
20-40	2,76	0,98
40-60	2,76	0,90
60-80	2,76	0,78
80-100	2,76	0,78
100-120	2,76	0,78

O preparo do solo foi feito pelo sistema convencional, o espaçamento entre os sulcos foi de 45 cm e a densidade de plantio foi de aproximadamente 12 plantas por metro, de acordo com as recomendações da cultivar. Os tratos culturais foram adubação, capina, controle preventivo de pragas e doenças, etc. Fez-se também a correção prévia do solo e controle de invasoras, conforme recomendado para a cultivar de soja utilizada, que foi a BRS Conquista,

desenvolvida na Embrapa Cerrados, que tem boa representatividade para a região Centro-Oeste. Suas características estão listadas na Tabela 1.

Tabela 2 – Características gerais da cultivar BRS Conquista

Características	BRS Conquista
Indicação	GO, DF, BA, MG, MT e MS
Cor da flor	Roxa
Hábito de crescimento	Determinado
Maturação (dias)	~ 130
Altura da planta	75-90
Sementes (Kg/ha)	70-80
População (mil pl/ha)	260-360
Época de semeadura	10/10 a 10/12
Adaptação a fertilidade	Média - Alta
Resistente	Acamamento; Mancha-olho-de-rã; C.da haste; Oídio.
Tolerante	Nematóide de galha.
Suscetível	Nematóide de cisto; Ferrugem.

O acompanhamento dos estados vegetativos da cultura (emergência, vegetativo e reprodutivo) e suas subfases foram feitos de acordo com os critérios propostos por FEHR et al. (1971), que é atualmente o mais seguido do mundo.

Segundo estes autores, a escala fenológica da soja fundamenta-se nas mudanças morfológicas e nos eventos fisiológicos associados, que se sucedem no ciclo da vida da planta, com maior precisão e segurança que o número de dias transcorridos após uma determinada fase.

Para fins práticos, na cultura da soja, o reconhecimento de um estado fenológico é caracterizado pelo número de nós vegetativos formados ao longo da haste principal da planta (simbolizada pela letra V seguida de outra letra maiúscula ou de um índice numeral, correspondente a cada estágio vegetativo) até o final do seu crescimento vegetativo (estádios vegetativos de Ve a Vn), e pela observação das diferentes fases evolutivas de seus órgãos reprodutivos, simbolizada pela letra R seguida por um índice numeral, correspondente a cada estágio reprodutivo (estádios reprodutivos de R1 a R8), (RITCHIE et al., 1994). A Figura 1 ilustra estes estádios.

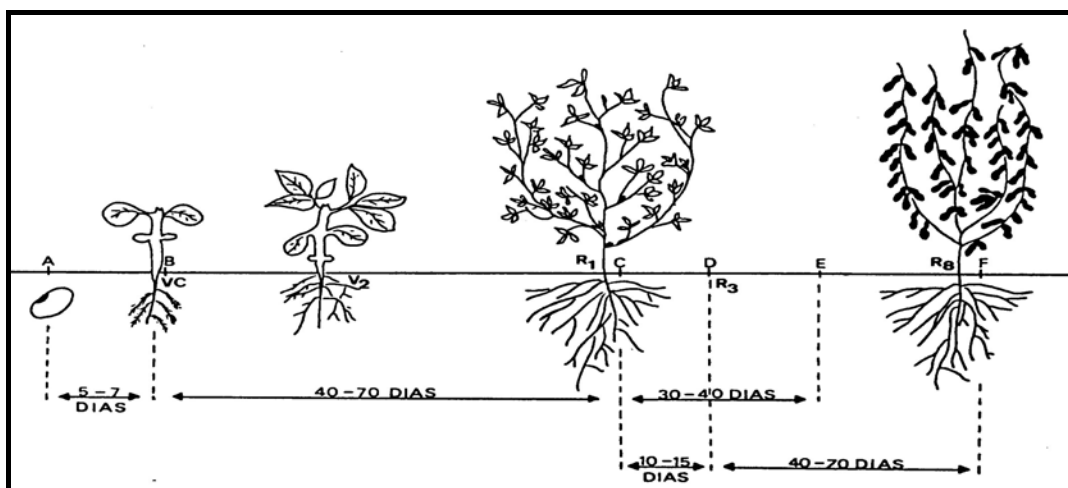


Figura 1 – Esquema mostrando a ocorrência e o tempo entre os diferentes estádios do ciclo da soja, desde o plantio (A), passando pela emergência (VC ou vegetativo cotiledonar), estágio vegetativo (V2-Vn) e chegando ao estágio reprodutivo (R1 – Rn) à maturação.

O experimento foi implantado no mês de outubro de 2004 e o plantio foi realizado em novembro, conforme recomendação de plantio para a cultivar, que visa garantir a ocorrência de precipitação e elevação da umidade do solo para boa germinação. Um sistema de irrigação com linha simples de aspersores foi montado no local do experimento para quando houvesse necessidade de irrigação. O monitoramento do experimento se deu ao longo de todo o ciclo da soja, que durou até o fim de março de 2005, sendo que a colheita foi feita no início de abril. A área experimental total foi de 5060 m² (110m x 46m).

O delineamento experimental foi Inteiramente Casualizado, com variação espacial em quatorze parcelas com seis repetições e temporal, com as medidas de teor de água do solo feitas a cada dois dias, ao longo de todo o ciclo da cultura e em seis diferentes profundidades do solo. Para a obtenção da evapotranspiração da cultura através do balanço hídrico do solo, monitorou-se o teor de água do solo nas parcelas no centro do experimento. Nestas parcelas, foram coletados os dados de entrada de água (irrigação ou chuva), tamanho da planta, número de nós vegetativos, número de folhas e hastes, para averiguar o estágio de desenvolvimento da soja.

Para calcular os valores de evapotranspiração, foi realizado o balanço hídrico em intervalos de tempo de dois dias, com o uso da equação:

$$\Delta A = P + I + R + AC - D - ETC \quad (1)$$

Onde:

ΔA – variação de armazenamento de água no solo (lâmina final – lâmina inicial)

P – precipitação (altura pluviométrica), em mm

I – irrigação (mm)

R – escoamento superficial (mm)

AC – ascensão capilar (mm)

ETc – evapotranspiração da cultura (mm)

D – drenagem (mm)

A precipitação (P) foi medida na estação meteorológica. Quando houve necessidade de irrigação (I), esta foi quantificada por dois coletores instalados em cada parcela.

Devido a topografia da área experimental ser plana, o componente escoamento superficial (R), foi desconsiderado.

Devido à intensidade das precipitações ocorridas e a complementação da irrigação nos períodos de estiagem, o solo foi mantido geralmente com teor de água na capacidade de campo, por isto a variação no armazenamento de água do solo (ΔA) foi praticamente nula, sendo considerado igual a zero na equação do balanço hídrico.

A irrigação foi manejada por tensiômetros instalados até a profundidade de 0,60m, visando assegurar a condição de teor de água no solo suficiente para que ocorresse a evapotranspiração máxima da cultura. Procurou-se então manter o potencial matricial com valores próximos à capacidade de campo. Foram instaladas quatro baterias de tensiômetros e as medidas foram realizadas três vezes por semana, pela manhã. Por meio dessas medidas, estimou-se o potencial matricial da água no solo (Ψ_m), através da seguinte equação para os tensiômetros digitais:

$$\Psi_m = Lt - hc \quad (2)$$

Onde:

Lt - leitura do tensímetro (bar)

hc - altura da coluna de água no tensiômetro (cm)

As curvas de retenção de água para as camadas de solo em estudo foram determinadas no Laboratório da Embrapa Cerrados. Utilizou-se o modelo de GENUCHTEN (1980) para a representação matemática da curva do potencial matricial da água no solo, em função do teor de água do solo (θ , cm^3/cm^3):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \Psi_m|^n]^m} \quad (3)$$

Onde:

θ_r – teor de água residual, cm^3/cm^3

θ_s – teor de água do solo saturado, cm^3/cm^3

Ψ_m – potencial matricial, cmca

α , n , m – parâmetros empíricos, dependentes do solo.

Os parâmetros empíricos da equação foram estimados através do uso do software SWRC. A lâmina líquida de irrigação (L , mm) foi determinada pela equação:

$$L = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot P \quad (4)$$

Onde:

θ_{cc} - teor de água do solo na capacidade de campo

θ_{pmp} - teor de água do solo no ponto de murcha permanente

P - profundidade de irrigação

Para o cálculo da lâmina bruta de irrigação (L_b , mm), utilizou-se a seguinte equação:

$$L_b = L / E_i \quad (5)$$

Onde:

L – lâmina líquida de irrigação

E_i – eficiência de irrigação

O tempo de irrigação (T_i , horas) foi determinado pela equação:

$$T_i = L_b / I_a \quad (6)$$

Onde:

L_b – lâmina bruta de irrigação, mm

I_a – intensidade de aplicação do aspersor, mm/h

Para a determinação da drenagem profunda ou ascensão capilar (fluxo descendente ou ascendente) no limite inferior do volume de solo considerado ($z = 60$ cm), utilizou-se a equação de Darcy – Buckingham, sob a forma:

$$q = -K(\theta) * \delta \Psi_t / \delta z \quad (7)$$

onde:

q – fluxo de água no solo, mm/dia

$K(\theta)$ – condutividade hidráulica, mm/dia

$\delta\Psi_t$ – potencial total da água no solo

z – coordenada vertical de posição, cm.

A determinação da condutividade hidráulica não saturada de solo - $K(\theta)$ – foi feita pelo método da umidade proposto por LIBARDI (1995), de acordo com o modelo:

$$K(\theta) = K_0 * e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad (8)$$

Onde:

K_0 – condutividade hidráulica saturada, mm / dia

γ – constante dependente do solo

θ – teor de água atual do solo, cm^3/cm^3

θ_0 – teor de água do solo saturado, cm^3/cm^3

Para isto foi saturada uma parcela de solo de 25 m^2 (5x5) dentro da área experimental, de maneira que os processos em seu centro não fossem afetados pelos seus limites. Na região central da parcela foram instalados os tubos de acesso da sonda de nêutrons para medida da umidade nas profundidades 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 0,90; 1,05 e 1,20 m.

Colocou-se água na superfície da parcela para umedecimento do perfil do solo, e depois da constatação de umidade constante com o tempo, a parcela foi coberta com uma lona plástica para evitar a evaporação direta e a entrada de água através do perfil do solo, foram efetuadas medidas periódicas de umidade com a sonda de nêutrons nas profundidades pré-estabelecidas. Os valores médios de condutividade hidráulica para diferentes profundidades do solo constam na Tabela 3.

Tabela 3 . Parâmetros da equação de condutividade hidráulica do solo na área experimental

Profundidade (cm)	K_0 (mm/dia)	γ	θ_0 (cm^3/cm^3)
30	14,786	57,084	0,520
60	23,442	78,386	0,578
90	28,785	84,122	0,585
120	26,921	82,048	0,583

A medida da umidade do solo foi realizada através do método de moderação de nêutrons utilizando-se um sonda de nêutrons da marca CPN (Campbel Pacific Nuclear), Hydroprobe. Em cada parcela foram introduzidos verticalmente no solo tubos metálicos que serviam de acesso para a sonda de nêutrons. As leituras, obtidas por contagem durante 1

minuto, foram feitas, em cada tubo, em diferentes profundidades ao longo do perfil do solo, em intervalos de 2 dias.

Para identificar a variação no armazenamento de água no solo foi verificada a diferença entre duas medidas de distintos períodos, a partir da sonda de nêutrons, considerando-se seis diferentes profundidades de solo, a saber: 0-20; de 20-40; 40-60; 60-80; 80-100 e 100-120cm.

A calibração da sonda de nêutrons foi desenvolvida na área do experimento através da comparação da porcentagem de umidade determinada gravimetricamente com os valores da contagem por minuto obtidos no mesmo instante em que eram coletadas amostras deformadas do solo. A umidade gravimétrica foi convertida em volumétrica, corrigindo-se o seu valor pela densidade do solo, que foi medida em laboratório. Com os valores do teor de água do solo e os da contagem da sonda (seis leituras no perfil mais a leitura padrão), procedeu-se ao tratamento estatístico dos dados e à obtenção de uma equação de regressão que permitiu converter os valores coletados de contagem por minuto (ou contagem relativa) em umidade volumétrica, ou lâmina d'água no solo naquele determinado momento (teor de água atual).

A curva de calibração da sonda de nêutrons obtida para as condições do experimento está demonstrada na figura 2, que plota de um lado o teor de água do solo e do outro a contagem relativa, obtida pela sonda de nêutrons. A correlação permite a obtenção da equação de regressão que permite calcular diretamente a umidade atual do solo, apenas com a medida da sonda de nêutrons, em campo.

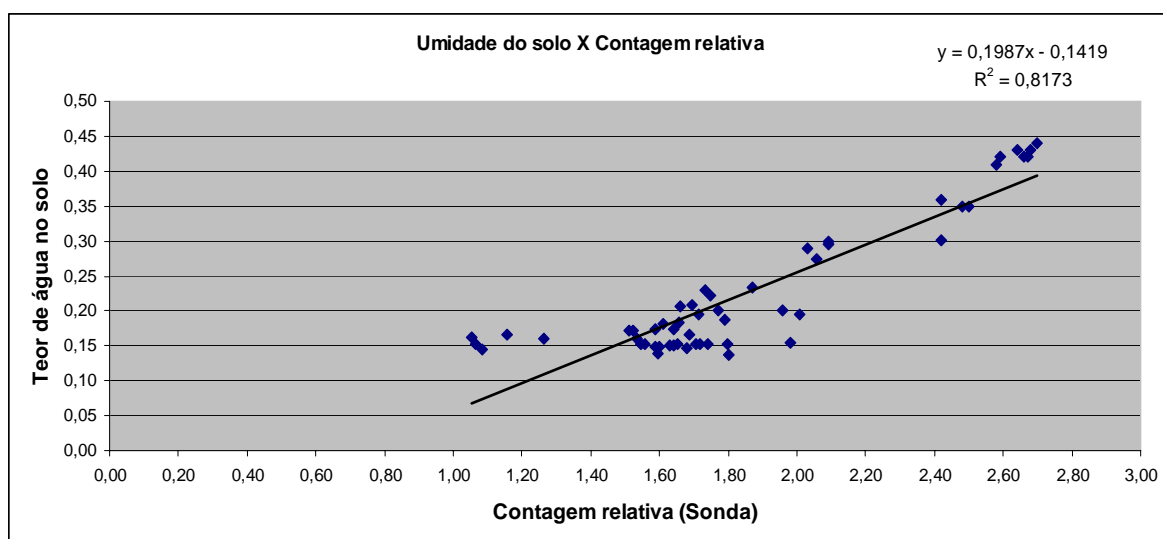


Figura 2 - Calibração da sonda de nêutrons para solo da região Vargem Bonita, DF.

A curva de calibração da sonda de nêutrons para o solo em estudo, relacionando a umidade volumétrica em função da contagem relativa apresentou um coeficiente de determinação em torno de 0,81. O coeficiente de determinação expressa numericamente tanto a força quanto o sentido da correlação entre duas variáveis (LEVIN, 1987). PREVEDELLO (1987), trabalhando com latossolo em Piracicaba – SP, obteve valores de coeficiente de determinação variando entre 0,51 e 0,89. Os dados apresentados mostram uma correlação positiva entre as variáveis, pois a medida em que o solo seca, a contagem relativa diminui.

A evapotranspiração de referência foi dada pela equação de Penman (FAO):

$$ET_o = c \cdot \{ W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) \} \quad (9)$$

Onde:

ET_o – Evapotranspiração de referência de um cultivo (mm/dia)

c - Fator de correção

W - Fator relacionado com a temperatura

R_n - Radiação líquida

$f(u)$ - Função relacionada com o vento = $0,27 \cdot (1 + V_2/100)$, onde V_2 é a velocidade do vento total em km/dia, obtida a dois metros de altura do solo;

$(e_a - e_d)$ – Diferença de pressão de saturação de vapor de água (e_a) e sua pressão real (e_d), em mbar .

O coeficiente da cultura é uma relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência, dado pela relação:

$$K_c = ETC / ET_o \quad (10)$$

Assim, o K_c faz a integração das características que diferenciam a evapotranspiração da cultura daquela considerada de referência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A divisão dos estádios vegetativos (FEHR et al., 1971) foi adaptada levando-se em consideração a observação a campo dos estádios de desenvolvimento da soja. Neste caso, foram observados em torno de 20 estádios, ao todo, sendo 11 vegetativos e 9 reprodutivos. A tabela 4 mostra a quantidade, a data de ocorrência e o tipo de estádio, observados a campo.

Tabela 4 – Divisão e data de ocorrência dos estádios vegetativos da soja no Distrito Federal, na safra 2004/2005..

Divisão e data de ocorrência dos estádios vegetativos da soja			
Nº	Período	Mês	Estádio
1	8 a 10	Nov	VE
2	15 a 21	Nov	VE-VC
3	22 a 28	Nov	VC-V1
4	29 a 05	Nov/Dez	V1
5	06 A 12	Dez	V1-V2
6	13 a 19	Dez	V2-V3
7	20 a 26	Dez	V3-V4
8	27 a 02	Dez/Jan	V4-V5
9	03 a 09	Jan	V5-V6
10	10 a 16	Jan	V6-V7
11	17 a 23	Jan	V7-R1
12	24 a 30	Jan	R1
13	31 a 06	Jan/Fev	R2
14	07 a 13	Fev	R3
15	14 a 20	Fev	R4
16	21 a 27	Fev	R5
17	28 a 06	Fev/Mar	R6
18	07 a 13	Mar	R7
19	14 a 20	Mar	R8
20	21 a 27	Mar	-

Há uma leve variação na ocorrência dos estádios fenológicos da soja daqueles descritos na literatura, o que é mais do que esperado, já que as condições de campo são diferentes a cada ano, com variações climatológicas, ambientais e produtivas, que levam a criar condições de produção única, fazendo variar o ciclo das diferentes cultivares de soja. Os ajustes foram feitos para que pudessem ser determinados, com o máximo de precisão possível, a faixa de ocorrência de determinado estádio de desenvolvimento, garantindo assim uma tabela que refletisse o comportamento da cultivar a campo, tornando-a uma ferramenta útil de previsão para os agricultores.

As variáveis que entraram no cálculo do balanço hídrico do solo são apresentados na tabela 5, que mostra os estádios de desenvolvimento, a data de ocorrência e o valor das variáveis: precipitação, irrigação, drenagem, evapotranspiração de referência (ET_o) medida pelo método de Penman - ET_o (P) – e pelo tanque classe A – ET_o (TA); evapotranspiração da cultura (ET_c) e o coeficiente de cultura da soja (K_c).

Tabela 5 – Variáveis climatológicas e edáficas; evapotranspiração e coeficientes da cultura (Kc) da soja no Distrito Federal, na safra 2004/2005.

Nº	Período	Mês	Estádio	Precipitação	Irrigação	Drenagem	ETo (TA)	ETo (P)	ETc	Kc
	(Dias)	-	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
1	8 a 10	Nov	VE	17,0	4,5	0,0	39,1	32,1	14,5	0,45
2	15 a 21	Nov	VE-VC	43,2	0,0	0,0	19,5	23,5	18,5	0,79
3	22 a 28	Nov	VC-V1	1,3	0,0	4,8	37,5	33,2	19,3	0,58
4	29 a 05	Nov/Dez	V1	0,8	0,0	4,5	26,4	26,9	22,2	0,83
5	06 A 12	Dez	V1-V2	0,0	0,0	0,0	29,4	29,2	20,8	0,71
6	13 a 19	Dez	V2-V3	0,0	5,0	0,0	14,8	24,2	22,8	0,94
7	20 a 26	Dez	V3-V4	0,0	4,0	0,0	27,9	26,2	25,3	0,96
8	27 a 02	Dez/Jan	V4-V5	31,8	0,0	0,0	20,7	25,0	26,4	1,05
9	03 a 09	Jan	V5-V6	97,8	0,0	4,8	24,2	25,8	27,3	1,06
10	10 a 16	Jan	V6-V7	33,0	0,0	6,3	27,6	26,5	27,0	1,02
11	17 a 23	Jan	V7-R1	25,7	0,0	5,7	26,6	26,4	34,8	1,32
12	24 a 30	Jan	R1	45,0	0,0	2,8	28,2	27,5	33,8	1,23
13	31 a 06	Jan/Fev	R2	141,5	0,0	0,9	28,4	26,2	34,1	1,30
14	07 a 13	Fev	R3	16,3	0,0	8,0	29,4	27,0	32,8	1,21
15	14 a 20	Fev	R4	38,6	0,0	10,8	28,4	27,6	32,1	1,16
16	21 a 27	Fev	R5	181,1	0,0	6,7	39,5	28,6	38,8	1,36
17	28 a 06	Fev/Mar	R6	72,9	0,0	12,1	20,0	24,4	38,0	1,56
18	07 a 13	Mar	R7	64,3	0,0	9,6	24,5	25,5	27,4	1,08
19	14 a 20	Mar	R8	101,3	0,0	8,4	23,8	24,8	23,8	0,96
20	21 a 27	Mar	-	142,2	0,0	10,2	17,5	24,0	14,0	0,58
Total				1056,4	13,5	108,4	569,5	570,6	541,2	-

A lâmina d' água total aplicada à cultura da soja (precipitação + irrigação), foi medida em 1.065 mm, ao longo do ciclo, que durou 133 dias. A demanda hídrica da soja, ou seja a água efetivamente utilizada ou suficiente para manter o solo em condições ideais de cultivo foi de 850 mm. A quantidade total de água que entrou no sistema foi suficiente para o requerimento hídrico da soja. O problema, na prática, no cerrado, não diz respeito à disponibilidade hídrica total, mas a sua distribuição ao longo dos estádios de desenvolvimento, como pode ser visto nos pequenos veranicos que ocorreram ao longo do ciclo, quando foi necessário irrigar para que o solo voltasse às condições ideais de disponibilidade hídrica.

A demanda hídrica da soja na região do Distrito Federal, que foi medida em 850mm ao longo de todo o ciclo é similar ao valores encontrados na literatura, como por exemplo o trabalho de BERLATO et al. (1986), que estudando a demanda hídrica da soja no Sul do Brasil, obtiveram uma ETm de 827 mm para todo o ciclo. AZEVEDO et al. (1989), obtiveram

para as condições semi-áridas do Nordeste brasileiro, uma ET_m de 620 mm, para todo o ciclo da soja.

FARIAS et al. (2001), ao realizaram um trabalho de caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil, inclusive em regiões de cerrado, obtiveram valores de evapotranspiração da cultura da soja variando de 550 a 800 mm, em média, de acordo com a localidade. MATZENAUER et al. (2003), obtiveram valores de evapotranspiração máxima a entre 758 e 794 mm ao longo de todo o ciclo da soja com plantio em novembro.

A análise conjunta das variáveis que levam à obtenção do coeficiente da cultura (K_c) para a soja permite visualizar a contribuição de cada um no cálculo do balanço hídrico e do próprio coeficiente da cultura. Quando a disponibilidade de água no solo foi alta, devido aos altos índices de precipitação ocorridos, verificou-se aumento na taxa evapotranspirométrica, tanto na evapotranspiração da cultura quanto na evapotranspiração de referência. Como em condições de campo ocorrem interações agroclimáticas não medidas pelo método empírico, a evapotranspiração da cultura sempre sofre maiores variações do que aquela de referência, refletindo diretamente nos valores de K_c .

O comportamento do coeficiente da cultura (K_c), ao longo de todo o ciclo da soja, demonstra que, apesar de pequenas diferenças sazonais, a demanda hídrica da soja é crescente ao longo do ciclo da cultura, alcançando o valor máximo nos estádios reprodutivos.

As variações sazonais são naturais, uma vez que os intervalos de medição são pequenos (semanais) e, considerando-se este período, as variações ocorrem provavelmente devido às características meteorológicas específicas de cada semana.

FARIAS et al. (2001) estimaram o consumo hídrico em cada fase fenológica da soja e para isto adaptaram os coeficientes de cultura (K_c) a partir daqueles obtidos por BERLATO et al. (1986) e por DOORENBOS & KASSAM (1979). Os resultados obtidos por estes autores encontram-se na Tabela 6, assim como os coeficientes de cultura obtidos no presente trabalho.

Tabela 6: Comparação entre estimativas de coeficiente de cultura (K_c) da soja encontrado por diferentes trabalhos (K_{c1} , K_{c2} e K_{c3}) e o K_c medido ($K_{c_{med}}$) no Distrito Federal, na safra 2004/2005.

Subperíodo	$K_{c_{med}}$	K_{c1} *	K_{c2}**	K_{c3}***
S – V2	0,58	0,30	0,56	0,56
V2 – R1	1,02	0,70	1,21	1,40
R1 – R5	1,27	1,00	1,50	1,50
R1 – R8	0,96	0,50	1,41	0,90
Média	0,96	0,62	1,17	1,09

* K_{c1} – FAO (1974) ** K_{c2} – BERLATO et al. (1986), na região Sul do Brasil *** K_{c3} – FARIAS et al. (2001), em regiões produtoras dos Estados do PR, GO, TO, MS, MT, MG, MA e BA.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com alguns resultados descritos na Tabela 6, observa-se que estes são similares, principalmente quando se considera o comportamento do coeficiente de cultura ao longo do ciclo. Em todos os trabalhos o valor mínimo de K_c é obtido no início do ciclo, enquanto o valor máximo ocorre nos estádios reprodutivos.

Dos resultados de K_c demonstrados na Tabela 6, os que melhor se relacionam com os obtidos neste trabalho são os de FARIAS et al. (2001), provavelmente porque estes autores também estimaram o K_c considerando áreas produtoras em regiões de Cerrado, assim como no presente trabalho.

Quando comparados aos resultados com aqueles preconizados pela FAO, percebe-se que os valores medidos a campo em área de cerrado do Distrito Federal são superiores, devido provavelmente à localização geográfica e variabilidade climática. O comportamento ao longo do ciclo no entanto é similar, já que a demanda hídrica é maior nos estádios de crescimento intermediários e nos estádios reprodutivos iniciais.

CONCLUSÕES

- A demanda hídrica da soja foi estimada em 850 mm ao longo de todo o ciclo;
- A demanda hídrica da soja é crescente ao longo do ciclo da cultura, alcançando o valor máximo nos estádios reprodutivos. Ocorreram variações sazonais, devido às características meteorológicas específicas de cada semana.
- Os coeficientes de cultura da soja variaram de 0,21 a 1,56, dependendo do estágio de desenvolvimento, sendo os maiores valores obtidos nos estádios reprodutivos da soja.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 330 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

AZEVEDO, P.V.; COSTA, J.P.R.; LEITÃO, M.M.V.B.R. Medidas e estimativas da evapotranspiração numa cultura de soja irrigada, nas condições semi-áridas do nordeste do Brasil. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6., 1989, Maceió. Anais... Maceió: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p. 185-194.

ATLAS DO DISTRITO FEDERAL II. Brasília: CODEPLAN, 1984. 381 P.

ÁVILA NETO, J. **Necessidades hídricas da videira na região do submédio São Francisco**. Campina Grande, 1997. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba.

BARNI, N.A.; MATZENAUER, R. Ampliação do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.6, n.2, p 189-203, 2000.

BERGAMASHI, H. BERLATO, M.A. **Efeitos de tratamentos de irrigação, espaçamento e população no rendimento de soja**. Trabalho apresentado na 2ª Reunião Conjunta da Soja RS/SC, 1974a.

BERGAMASHI, H. **Efeito de níveis de umidade do solo sobre o rendimento de duas cultivares de soja (Glycine Max L. Merrill) em três épocas de semeadura**. Porto Alegre, Faculdade de Agronomia UFRGS, 1973. Tese Mestrado – Solos.

BERGAMASHI, H.; BERLATO, M.A. **Efeitos de tratamentos de umidade do solo e espaçamento no comportamento de duas cultivares de soja (Glicyne Max L. Merrill) em três épocas de semeadura**, s.n.t. 29p. Trabalho apresentado na 2ª Reunião Conjunta da Soja RS/SC, 1974b.

BERGAMASHI, H.; BERLATO, M.A.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R. Efeitos de tratamentos de irrigação, espaçamento e população no rendimento da soja. In: INSTITUTO

DE PESQUISAS AGRONOMICAS, Porto Alegre, RS. **Soja: ecologia e praticas culturais**. Porto Alegre, 1976. p. 1-23.

BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987. 93 p. Tese de Doutorado.

BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. **Consumo de água da soja. I. Evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1979, v. 1, p. 53-58.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; GONÇALVES, H. M. Relação entre o rendimento de grãos de soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 695-702, 1992.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 22, n.2, p.243-259, 1986.

BERLATO, M.A.; GONÇALVES, H.M. Relação entre o índice hídrico P/ETP e rendimento da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill). **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v.1, n. 2, p. 227-233, 1978.

BEZERRA, F.M.L.; OLIVEIRA, C.H.C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura para o milho em Fortaleza, CE. **Engenharia Agrícola**, v. 19, n.1, p. 8-17, set. 1999.

BUNTLEY, G.J.; McCUTCHEN, T.; MORGAN, H. Jr. **Soybean yields as affected by rainfall distribution during flowering and pod filling**. Tennessee Farm and Home Science, Karamville, p.8-10, oct. 1973.

CONFALONE, A.E.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.165-1169, 1998.

CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HAAS, J.C. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p. 446-459, 2001.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre : Editora da UFRGS, 1992. p. 85-97.

CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; DALMAGO, G.A. et al. **Cartas de perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999, 52p. (Boletim de pesquisa, 1).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. M. **Efectos del agua em el rendimientos de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Riego e Drenage, 33).

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

DOSS, B.D.; THURLOW, D.L. Irrigation, row width and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 66, n. 2, p. 220-223, 1974.

DOSS, G. S.; PEARSON, R.W.; ROGGERS, H. T. Effect of soil water stress at various growth stages on soybeans yeld. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, n. 2, p. 297-299, 1974.

FARIAS, J.R.B.; ALMEIDA, I.R.; GARCIA, A. **Zoneamento agroclimático da cultura da soja pão estado do Paraná**. Londrina: Embrapa-Soja, 1997, 84 p. (Documentos, 102).

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p. 415-421, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, H.E.; HARWOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, Madison, n.6, p. 929-931, Nov/Dec. 1971.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 661-669, maio 1992.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, mar. 2001.

FRANKE, A.E.; DORFMAN, R. Viabilidade econômica da irrigação, sob condições de risco em regiões de clima subtropical. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n.12, p. 2003-2013, 1988,

GENUCHTEN, M. Van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.41, p. 892-898, 1980.

GRISSON, P.; RAWEY, W. A.; HOGG, P. **Crop response to irrigation in the Yazoo – Mississippi Delta**. Mississippi: Mississippi Agricultural Experimental Station, 1995. 21 p. (Bulletin, 531).

HOWELL, R.W. Physiology of the soybean. In: NORMAN, A.G. (Ed). **The soybean**. New York: Academic Press, 1967. p. 75-124.

JENSEN, M. E. **Water consumptions by agricultural plant growth**. New York : Academic, 1968. v. 2, p. 1-22.

JUNIOR, D.V.; GOBBI, M.F, Um modelo de interação superfície-atmosfera para a estimativa de evapotranspiração sobre uma cultura de soja no estado do Paraná. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, **Anais...**, v.1, p. 327 – 328, UNIFRA, SBA, UFSM, Santa Maria, RS, 2003.

KIIHL, R.A.S.; GARCIA, A. The use of the long-juvenile trait in breeding soybean cultivars. In: WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 4., 1989, Buenos Aires. **Proceedings**. Buenos Aires : A SOJA, 1989. v.2, p.994-1000.

LEVIN, J. **Estatística aplicada a ciências humanas**. 2 ed. São Paulo: Harbra, 1987. 392 p.

LIBARDI, P.L. **A dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Ed. do autor, 1995. 497 p.

LOPES, P.M.O. **Evapotranspiração da mangueira na região do submédio São Francisco**. Campina Grande, 1999. 108 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: **Agrometeorologia aplicada à Irrigação**. Coordenado por Homero Bergamaschi. – 2 ed. – Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1999, p. 33-47.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.6, p. 1013-1019, 2003.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.

MEDEIROS, S. L. P.; WESTPHALEN, S. L.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 1, p. 1-10, jan. 1991.

MOMEN, N.N.; CARLSON, R.E.; SHAW, R.H.; ARJMAN, O. Moisture-stress effects on the yield components of two soybean cultivar. **Agronomy Journal**, n. 71, p.86-90, 1979.

MORAES JUNIOR, C. Estudo sobre a produtividade da cultura de soja. In: SEMINARIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO. Porto Alegre, 1970. **Anais...** SUDESUL/GEIDA, 1971. p. 165-72.

MOTA, F.S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: VERNETTI, F. (Coordenador). **Soja**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 463p.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B. et al. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E.R. (Ed.) **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 254p.

PORTO, M.C.M. **Efeito da irrigação no período reprodutivo e diferentes níveis de fertilidade do solo sobre o rendimento, absorção de nutrientes e características agrônômicas da soja Glycine Max (L.) Merrill**. Porto Alegre, Faculdade de Agronomia, UFRS, 1975. 125p. Tese Mestrado – Agronomia – Fitotecnia.

PREVEDELLO, C.L. **Teoria do fluxo da água em solos não saturados: novos conceitos e aplicações**. 1987. 264 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

QUEIROZ, E.F.; MOLION, L.C.B.; MINOR, H.C.; NEUMAIER, N. Um modelo matemático de quantificação do efeito da disponibilidade hídrica em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n.10, p. 683-690, 1996.

QUEIROZ, J. E.; CALHEIROS, C. B.; PESSOA, P. C. S.; FRIZZONE. J. A. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 1, p. 55-61, 1996.

RAMOS, C.M.C. **Distribuição do sistema radicular e consumo de água da bananeira irrigada por microaspersão**. Viçosa, 2001. 62 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

RASSINI, J.B. **Efeito de períodos de estiagem no rendimento e qualidade da semente de soja (Glycine Max (L.) Merrill**. Porto Alegre, Faculdade de Agronomia, UFRS, 1980. 80p. Tese de Mestrado – Agronomia – Fitotecnia.

ROGERS, H.V. Selection and importance of water. In: **Soybean production: recent research findings**. [S.l.]: Auburn Agricultural Experimental Station, 1971. p 11-16 (Bulletin, 413).

RUNGE, E. A.; ODELL, R.T. The relation between precipitation, temperature and the yield of soybeans at the agronomt south farm. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, n. 5, p. 245-247, May, 1960.

SANTOS FILHO, J.M. **Efeito da irrigação durante o período reprodutivo e de três espaçamentos entre filas sobre o rendimento de grãos e características agronômicas da soja (*Glycine Max* L. Merrill)**. Porto Alegre, Faculdade de Agronomia, UFRS, 1975. 122 p. Tese Mestrado – Agronomia – Fitotecnia.

SCHACKER, C.A.; MATZENAUER. Disponibilidade hídrica para a cultura da soja em anos de El Nino, La Ninam e Neutros, nas regiões climáticas do planalto médio e depressão central do Rio Grande do Sul. XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...**, VOL I, Páginas 327 e 328 UNIFRA, SBA, UFSM, Santa Maria, RS, 2003.

SHAW, R.A.; LAING, D.R. Moisture stress and plant response. In: PIERRE, W.H.; KIRKHAM, D.; PESEK, J. & SHAW, R. **Plant environment and efficient water use**. Madison, American Society of Agronomy, 1966. Cap 5, p. 73-94.

SIONIT, N.; KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy journal**, Madison, v. 69, n.2, p.274-278, 1977.

SOUZA, P.I. de M. de; SPEHAR, C.R.; MOREIRA, C.T.; URBEN FILHO, G. Technology to extend soybean cultivation to the Tropical Savannas of Brazil. In: WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 5., SOYBEAN FEEDS THE WORLD, 1994, Chiang Mai. **Proceedings**. Bangkok : Kasetsart University Press, 1997. p.478-481.

SPEHAR, C.R. Breeding soybeans to the low latitudes of Brazilian Cerrados (Savannahs). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.8, p.1167-1180, ago. 1994.

ZANETTI, H.N.; OLIVEIRA, S.S. **Irrigação de soja em Camaquã**. Lav. Arroz., 312:35-6, 1979.

CAPÍTULO 2

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL.

Trabalho enviado para publicação na Revista Brasileira de
Agrometeorologia – RBA.

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA NO DISTRITO FEDERAL.

RESUMO

A água é a substância que possui maior relevância para o desenvolvimento vegetal, sendo de indispensável importância em todos os estádios vegetativos. Tendo em vista a importância do entendimento das relações hídricas das culturas cultivadas no cerrado, desenvolveu-se este trabalho com a cultura da soja, que ocupa posição de destaque na economia brasileira. Uma das principais causas da variação de produtividade da soja no Brasil tem sido a ocorrência de deficiência hídrica em alguma de suas fases de cultivo. Este estudo teve como objetivo verificar a evapotranspiração da cultura ao longo do ciclo da soja, no período da safra 2004/2005, no Distrito Federal. Os valores da evapotranspiração de referência pelos métodos do tanque classe A e pela equação de Penman modificada, foram comparados à evapotranspiração da cultura da soja, diretamente medida a campo, com uma sonda de nêutrons. Para tanto foi usada a área experimental de agroclimatologia, localizada na Fazenda Água Limpa (FAL), da Universidade de Brasília, que forneceu os dados meteorológicos observados durante o período de condução do ensaio. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo preparado pelo sistema convencional. A precipitação foi medida na estação meteorológica. A medida do teor de água do solo foi realizada utilizando-se uma sonda de nêutrons. Aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância, visando quantificar as diferenças. Também foi aplicado o teste desenvolvido por Willmott, que quantifica matematicamente a dispersão dos dados em relação ao método considerado padrão. Os principais resultados foram: o teste de Tukey ao nível de 5% de significância, revelou diferença significativa para o método de Penman na primeira semana de estudo (estádio VE), e a partir da 11ª semana (estádio V7-R1) até a 16ª semana (estádio R5). Para o método do Tanque Classe A foram encontradas diferenças significativas também na primeira semana (estádio VE) e a partir da 6ª semana (estádio V2-V3), apresentando estas diferenças também nas semanas: 8ª (V4-V5); 11ª a 13ª e 17ª semanas; o comportamento da evapotranspiração de referência, pelo método indireto da equação de Penman demonstrou diferença significativa, pelo teste de Tukey a 5%, em sete das 20 semanas monitoradas, coincidindo com aquelas de maior demanda hídrica por parte da cultura; o método do tanque classe A variou bastante com relação ao método direto, algumas vezes subestimando, outras superestimando os valores de evapotranspiração, apresentando diferença significativa em nove das vinte semanas monitoradas. O método de Penman apresentou melhor desempenho semanal com relação ao método direto, tendo obtido índice de 0,84 (muito bom) para o período estudado. Para o Tanque Classe A, os índices semanais foram, em média de 0,70 (bom), mostrando uma boa correlação com o método direto, ainda que inferior ao obtido pela equação.

Palavra – Chave: 1. Evapotranspiração. 2. Tanque classe A. 3. Soja. 4. Balanço hídrico. 5. Sonda de nêutrons

COMPARATION OF THE METHODS TO EVAPOTRANSPIRATION CALCULATION TO SOYBEAN CROP IN DISTRITO FEDERAL

ABSTRACT

Water is a substance that is relevant to vegetable development, and it is essential to all vegetative stages. This work was developed to understand the importance of water relations to Cerrado crop, specially in soy crop that placed a high position in Brazilian economy, and this justify the search for new informations that help in its cultivation, beyond to reduce the risk of loss. The main cause of soy productive variation in Brazil it is the water shortage in some of cultivation period. This study aims to check the crop evapotranspiration throughout soy cycle in haverst 2004/2005 in Distrito Federal, located in 15 ° 56' S of Latitude and 47° 56 W of Longitude. After the evapotranspiration reference values were obtained using Pan evaporation method and Penman equation, the compared results was done with soy crop evapotranspiration, measure in local. To obtain these details used climatologic experimental area in Agua Limpa farm (FAL) that belongs to Brasilia University. Soil is classified as vermelho amarelo Latossolo. The used soil preparation it was conventional. The precipitation was measured by Meteorologic station. The soil humidity measure was carried out through neutrons moderation method, using neutrons probe. It applied the 5% of significance Tukey test that aimed to qualify the differences between them. It also done a test developed by Willmott. The main results in were: 5% of significance Tukey test showed significative difference to Penman method from the first week (VE stage); 11^a week (V7-R1) stage to 16^a week (R5 stage). To Pan evaporation method were found singnificative difference from first week (VE stage); 6^a week (V2-V3 stage), it also showed these differences in 8^a (V4 -V5), and in 11^a, 13^a, 17^a weeks. The behavior of reference evapotranspiration by indirect Penman equation method showed significative differences in seven of 20 weeks that was checked, these facts coincided with larger demanded of water by crop. The Pan evaporation tank method showed enough variation in relation to direct method, sometimes evapotranpiration values were under estimated or upper estimated, showed significative differences in nine of 20 weeks that was checked; the Penman method presented the best performance in relation to direct method, during the week that were studied, obtaining a rate of 0,84 (very good) to studied stages. To Pan evaporation, the weekly rates were, in average of 0,70 (good), they show a good relation between this method and the direct method, although they present inferior values to the equation that was used.

Keywords: Evapotranspiration. 2. Pan evaporation. 3.Soybean. 4. Water Balance. 5. Penman.

INTRODUÇÃO

A água é a substância que possui maior relevância para o desenvolvimento vegetal, sendo de indispensável importância em todos os estádios vegetativos. A utilização de métodos que visem quantificar a água utilizada pela a planta, através da transpiração ou pela evaporação direta do solo, torna-se importante para uma melhor utilização dos recursos hídricos pela agricultura.

A água utilizada pelos vegetais obedece a uma dinâmica, através do sistema solo-planta-atmosfera, respondendo a um gradiente que impulsiona um fluxo contínuo de água, da raiz até as folhas (BERNARDO, 1989). Esse suprimento hídrico é vital durante todo o ciclo vegetativo da planta. Os principais responsáveis pelo fluxo hídrico são os elementos climáticos, que regulam a fisiologia vegetal, criando as condições necessárias ao estabelecimento desse balanço hídrico, fazendo com que aproximadamente 90% da água consumida não permaneça na planta, mas seja transferida para a atmosfera, através da evapotranspiração (REICHARDT, 1987).

Um solo em sua capacidade de campo é capaz de fornecer um bom suprimento de água para a planta, porém essa reserva geralmente é limitada, variando conforme o tipo de solo, devido às suas características físico-químicas e estruturais (D'ANGIOLELLA, 2003). A disponibilidade hídrica do solo influencia na produtividade de uma cultura qualquer, e devido à importância da água na produção vegetal, fazem-se necessários estudos visando sua melhor utilização em culturas, de maneira a regular a irrigação e alcançar os níveis produtivos esperados (BERNARDO, 1989).

O cerrado ocupa grande parte do território brasileiro, sendo considerado uma fronteira agrícola de enorme potencial, por possuir condições topográficas ideais para a agricultura, com quase 70% de suas terras agricultáveis (FERREIRA & VASCONCELLOS, 1996). Apresenta uma grande facilidade de escoamento de produção, pode tornar-se produtivo com um manejo correto, mesmo possuindo solos de baixa fertilidade. Possui estação seca muito bem definida, caracterizada por um longo período de estiagem, mas a insolação e a temperatura se mostram como fatores climáticos favoráveis para uma alta produtividade de determinadas culturas apesar da falta de chuva, que deve ser compensada pela irrigação (MOREIRA, 1992).

A cultura da soja ocupa posição de destaque na economia brasileira, o que justifica a busca de novas informações no sentido de aperfeiçoar seu cultivo e reduzir os riscos de prejuízos (ARANTES & MIRANDA, 2000). Dentre todos os fatores envolvidos na produção

agrícola, o clima apresenta-se como um dos fatores de maior interferência. Os efeitos da ocorrência de certas adversidades climáticas, como secas, geadas, ventos fortes, podem em alguns casos, ser total ou parcialmente amenizados, desde que possam ser previstos e manejados.

Uma das principais causas da variação de produtividade da soja no Brasil tem sido a ocorrência de deficiência hídrica. A necessidade de água na soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos, decrescendo após esse período, segundo ARANTES & MIRANDA (2000).

Muitos trabalhos são elaborados a partir da comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração, tentando assim obter valores mais próximos de situações reais, visando a calibragem de fórmulas conforme a região.

No Brasil, diversos estudos foram elaborados a partir da comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração, visando-se estabelecer quais deles melhor se adaptam a determinada região. Os trabalhos de CAMARGO (1966) com evapotranspiração foram importantes para o início dos estudos de evapotranspiração no país.

MOTA & BEIRSDORF (1976) realizaram estudos comparativos nos quais verificaram que a evaporação do tanque classe A é 1,3 vezes maior do que a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman.

Os trabalhos de DOORENBOS & KASSAM (1979) também compararam métodos de estimativa de evapotranspiração e obtiveram os coeficientes de cultura para diversas culturas produzidas no Brasil assim como o trabalho de ENCARNAÇÃO E VILLA NOVA (1980), que estudaram diferentes métodos de cálculo de evapotranspiração e coeficientes de cultura, visando comparar os valores de K_c obtidos por diferentes métodos com os valores sugeridos pela FAO, concluindo que os valores da FAO eram subestimados para as condições brasileiras, demonstrando a necessidade de verificação de métodos mais adequados para as diferentes regiões de cultivo.

BUTLER & MIRANDA (1984), compararam os métodos de Penman e Thornthwaite para estimar a evapotranspiração no sudeste da Bahia, concluindo que o primeiro é o mais preciso, embora se possa utilizar o segundo para períodos anuais.

BERLATO et al., 1986 na região Sul do país, calcularam a evapotranspiração máxima da soja, e avaliaram o desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração, definindo a demanda hídrica da soja para aquela região, bem como os coeficientes de cultura para os diferentes estádios vegetativos da soja.

De acordo com CASTRO NETO & SOARES (1989), a escolha de um método para o cálculo da evapotranspiração depende do seu grau de precisão e, especialmente, da disponibilidade de dados para sua utilização, tornando então necessária uma verificação do comportamento de cada método em nível local.

ALLEN et al. (1989), realizaram estudos comparativos entre estimativas de evapotranspiração, tendo como padrão métodos lisimétricos, em diversos locais do mundo. Estes estudos atestaram a eficácia do método de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração.

MOTA (1989), realizou trabalhos onde determinou-se a importância relativa das variáveis climatológicas no valor da evapotranspiração. No Mato Grosso do Sul, SORIANO & PEREIRA (1993), avaliaram o comportamento de onze diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração, tendo como padrão o método do tanque classe A, indicando aqueles que melhor se aplicaram àquela região.

Para SANTOS et al. (1994), a escolha de um método de estimativa da evapotranspiração de uma cultura deve apresentar bom desempenho na região climática, com a menor resolução temporal possível, levando-se em consideração os dados disponíveis para sua obtenção. STONE & SILVEIRA (1995) mediram a evapotranspiração para fins de irrigação, em regiões de cerrado do Estado de Goiás.

No Distrito Federal, estudos de evapotranspiração foram realizados por DI LASCIO et al. (1994) e FERREIRA & VASCONCELLOS (1996), utilizando-se a comparação de métodos de estimativa de evapotranspiração e adaptando-os para diferentes culturas no cerrado.

FERREIRA & PEREIRA (1999), citados por D'ANGIOLELLA (2003), em trabalho realizado na Bahia, concluíram que para as condições locais, os métodos da Radiação Solar e Penman original apresentaram estimativas melhores de evapotranspiração que o tanque classe A, utilizando-se como padrão o método de Penman-Monteith.

No Rio Grande do Norte, os métodos do tanque classe A e Penman-Monteith apresentaram um comportamento similar, de acordo com MAIA et al. (1999). Já AMORIM et al. (2001), ao comparar estes métodos, também no RN, concluiu que o método de Penman-Monteith apresentou resultados melhores que os outros.

SERRA & VASCONCELLOS (2000) realizaram um estudo para aferir a evapotranspiração da cultura do feijão no Distrito Federal e elaborar tabelas de consumo hídrico da cultura do feijão para a utilização pelos agricultores da região.

LUNARDI & LUNARDI (2001), avaliaram o desempenho do método de Penman-Monteith em Botucatu, São Paulo, e observaram que este método varia de acordo com a umidade da superfície do solo, necessitando de padronização quanto a este item para manter a precisão.

SILVA et al. (2001) compararam a estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith, Hargreaves e tanque classe A em Campina Grande, Paraíba. Estes autores observaram que o método de Penman-Monteith superestimou o de Hargreaves em períodos mensais e semanais, além de recomendarem cautela na utilização do método do tanque classe A para se estimar a ET_0 .

Na Bahia, PEREIRA et al. (2001), avaliaram o comportamento dos métodos de Blaney Criddle, Hargreaves e Thornthwaite, verificando que este último subestimou os valores de evapotranspiração em todos os casos estudados.

MENDES & VASCONCELLOS (2002); MENDES et al. (2004) e VASCONCELLOS et al. (2004) utilizaram a aferição de métodos para alcançar valores reais para ajustes nas irrigações dos agricultores da região de cerrado do Distrito Federal trabalhando com diferentes culturas e métodos de estimativa da evapotranspiração. Entre os resultados encontrados por estes autores, um dos trabalhos mostrou que a equação de Penman-FAO foi o método que melhor se relacionou ao método lisimétrico, quando comparado a outros métodos, como o do tanque classe A, obtendo índices bastante satisfatórios de correlação para a região.

Devido às condições climáticas específicas de cada região, observa-se um comportamento diferenciado da evapotranspiração para cada localidade, sendo possível estabelecer-se previamente um padrão e a partir dele se avaliar o comportamento de outros métodos de aferição da evapotranspiração. Pode-se finalmente se estabelecer os melhores métodos para uma região e posteriormente utiliza-los em regiões de clima semelhante (MEDEIROS, 1998 citado por D'ANGIOLELLA, 2003).

Este estudo teve como objetivo verificar a evapotranspiração da cultura ao longo do ciclo da soja, no período da safra 2004/2005, na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL-UNB), próxima ao núcleo rural da Vargem Bonita, localizada aproximadamente na latitude $15^{\circ} 56'S$ e $47^{\circ} 56'W$. Após obtidos os valores da evapotranspiração de referência pelos métodos do tanque classe A e pela equação de Penman modificada, fez-se a comparação dos resultados com a evapotranspiração da cultura da soja, diretamente medida a campo, com a utilização de uma sonda de nêutrons. A comparação forneceu dados para a validação dos dois métodos, relacionando-os e indicando qual o mais

preciso para as condições climáticas do DF. As informações meteorológicas utilizadas foram retiradas do laboratório de agroclimatologia, localizado na FAL-UNB.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento que serviu de base para este estudo foi implantado na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, localizada próxima ao núcleo rural da Vargem Bonita, DF, cujas coordenadas geográficas estão entre a latitude 15° 47'S e longitude 47° 56'W, a uma altitude de 1080 m.

No Distrito Federal, conforme a classificação climática de Köppen, apresentada pelo ATLAS DO DISTRITO FEDERAL (1984), ocorre o tipo climático Cwa, caracterizado pela ocorrência de duas estações bem definidas: a seca, com início em abril e que prossegue até meados de setembro e uma estação chuvosa correspondente ao restante do ano.

As características meteorológicas observadas durante o período de condução do ensaio foram monitoradas pela estação meteorológica da área experimental de agroclimatologia localizada na FAL-UnB. A estação ocupa uma área de 160 metros quadrados e possui uma estação automática e uma estação convencional.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, bem drenado, profundo e ocupando um relevo plano. Foram realizadas determinações físicas, químicas e hídricas do solo pelo Laboratório de Física do Solo da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina – GO.

O preparo do solo foi feito pelo sistema convencional, o espaçamento entre os sulcos foi de 45 cm e a densidade de plantio foi de aproximadamente 12 plantas por metro, de acordo com as recomendações da cultivar. Os tratos culturais foram adubação, capina, controle preventivo de pragas e doenças, etc. Fez-se também a correção prévia do solo e controle de invasoras, conforme recomendado para a cultivar de soja utilizada, que foi a BRS Conquista, desenvolvida na Embrapa Cerrados, que tem boa representatividade para a região Centro-Oeste.

O acompanhamento dos estados vegetativos da cultura (emergência, vegetativo e produtivo) e seus subperíodos foram feitos de acordo com os critérios propostos por FEHR et al. (1971), que é atualmente o mais seguido do mundo.

O experimento foi implantado no mês de outubro de 2004, seguindo a recomendação agrônômica para a soja, que visa garantir a ocorrência de precipitação e fotoperíodo adequado para a cultura da soja. Um sistema de irrigação com linha simples de aspersores foi montado e mantido no local do experimento, caso houvesse necessidade de irrigação.

O monitoramento do experimento se deu ao longo de todo o ciclo da soja, que durou até o fim de março de 2005, sendo que a colheita foi feita no início de abril. A área experimental total foi de 5060 m².

Foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração, os dados das parcelas centrais, onde foi garantido o pleno atendimento da demanda evapotranspirométrica bem como alguma percolação. Foram ainda determinados fatores como bordadura e turno de rega.

Para calcular os valores de evapotranspiração da cultura da soja, foi realizado o balanço hídrico nos intervalos de tempo entre as irrigações feitas, com o uso da equação:

$$\Delta A = P + I + R + AC - D - ETC \quad (1)$$

Em que:

P = precipitação;

I = irrigação;

ETc = evapotranspiração da cultura

D = percolação profunda;

AC = ascensão capilar

R = escoamento superficial;

ΔA = variação de armazenamento de água no solo

A precipitação (P) foi medida na estação meteorológica. Quando houve necessidade de irrigação (I), esta foi quantificada por dois coletores instalados em cada parcela.

A medida da umidade do solo foi realizada através do método de moderação de nêutrons utilizando-se um sonda de nêutrons gama, marca CPN (Campbel Pacific Nuclear). Em cada parcela foram introduzidos verticalmente no solo tubos metálicos que serviam de acesso para a sonda de nêutrons. As leituras, obtidas por contagem durante 1 minuto, foram feitas, em cada tubo, em diferentes profundidades ao longo do perfil do solo, em intervalos de 2 dias.

Para identificar a variação no armazenamento de água no solo foi medida a diferença entre duas medidas de distintos períodos, a partir da sonda de nêutrons, considerando-se seis diferentes profundidades de solo, a saber: 0-20; de 20-40; 40-60; 60-80; 80-100 e 100-120cm.

A evapotranspiração de referência foi dada pela equação de Penman (FAO):

$$ET_o = c \cdot \{ W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) \} \quad (2)$$

Onde:

E_{To} - Evapotranspiração de referência de um cultivo (mm/dia)

c - Fator de correção

W - Fator relacionado com a temperatura

R_n - Radiação líquida

$f(u)$ - Função relacionada com o vento = $0,27 \cdot (1 + V^2/100)$, onde V^2 é a velocidade do vento total em km/dia, obtida a dois metros de altura do solo;

$(e_a - e_d)$ – Diferença de pressão de saturação de vapor de água (e_a) e sua pressão real (e_d), mbar.

A evapotranspiração de referência estimada pelo método do Tanque Classe A foi medida a partir da evaporação da água do tanque. Para transformar esses dados em evapotranspiração, é necessária a multiplicação pelo coeficiente K_p do tanque, dado pela equação:

$$E_{To} = E_{vTA} \cdot K_p \quad (3)$$

Onde:

E_{To} = evapotranspiração de referência (mm)

E_{vTA} = evaporação no Tanque Classe A (mm)

K_p = coeficiente do tanque

Os coeficientes K_p utilizados foram retirados do trabalho de DOORENBOS & PRUITT (1979), que são mundialmente utilizados.

Para avaliação do comportamento da evapotranspiração da cultura no período, foi adotado como padrão o método direto do balanço hídrico do solo, com a sonda de nêutrons, já que se espera que medidas diretas sejam mais precisas que os métodos empíricos ou indiretos. Foi montado um modelo de análise de variância para comparar os resultados obtidos pelo balanço hídrico, levando em consideração as variações semanais. Além disso, a análise também serviu para indicar a discrepância entre as medidas feitas pelo método direto e os indiretos. Foi utilizado o teste de Tukey a 5% de significância, visando-se quantificar estatisticamente essas diferenças.

Aplicou-se ainda o teste desenvolvido por Willmott (ROBINSON & HUBBARD, 1990), que, através de um coeficiente designado concordância ou exatidão (designado pela letra “d”), quantifica matematicamente a dispersão dos dados em relação ao método considerado padrão. A concordância se refere à exatidão ou aproximação dos dados estimados aos verdadeiros, observados, podendo ser avaliada pelo afastamento dos pontos cotados em um gráfico, com relação à reta de valores iguais, sendo calculado pela fórmula:

$$d = 1 - [\sum (P_i - O_i)^2 / \sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2] \quad (4)$$

Onde:

d = coeficiente de concordância

P_i = evapotranspiração estimada pelo método testado (mm)

O_i = evapotranspiração estimada pelo método padrão (mm)

O = média dos valores observados pelo método padrão (mm)

A precisão, dispersão dos valores em torno da média é dada pelo coeficiente de correlação “r”, ou de determinação “r²”, que são índices estatísticos que indicam o erro aleatório. CAMARGO & SENTELHAS (1989), propõem um índice de confiança “c”, que reúne as indicações dos dois coeficientes, “d” e “r”, dado por:

$$c = r * d \quad (5)$$

Os valores desse índice “c” variam de 0,0 para nenhuma concordância a 1,0 para concordância perfeita entre os dados, qualificando os resultados de acordo com a tabela 7.

Tabela 1 - Classificação do desempenho segundo o índice de confiança “c”

Valor do Índice “c”	Desempenho
≥ 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estabelecendo-se como padrão o método direto do balanço hídrico com sonda de nêutrons, pôde-se fazer a comparação adequada entre os métodos de aferição da evapotranspiração. A tabela 2 apresenta os valores de evapotranspiração medidos pelo método do balanço hídrico e evapotranspiração de referência medidos pela equação de Penman e pelo tanque classe A.

O teste de Tukey ao nível de 5% de significância, revelou diferença significativa para o método de Penman na primeira semana (estádio VE). Depois, somente houve diferença significativa à partir da 11ª semana (estádio V7-R1) até a 16ª semana (estádio R5), ou seja, em sete das vinte semanas de estudo. A ETo medida pela equação de Penman subestimou a ETc da cultura da soja nas semanas em que a demanda hídrica foi maior, no período que vai do final do estágio vegetativo até o estágio reprodutivo pleno (R5), quando há formação de vagens e grãos.

No entanto, considerando-se todo o ciclo, o método de Penman ora superestimou, ora subestimou os valores de evapotranspiração da cultura em determinados períodos do estudo, com relação ao método direto, o que demonstra a inespecificidade do método para as peculiaridades de uma cultura isolada.

O aumento da demanda evapotranspirométrica por parte da cultura da soja nesta fase parece não ser demonstrado pelo método. Segundo FERREIRA (1996), o principal fato a ser considerado ao utilizar-se a equação de Penman, é que um único valor que modifica a quantificação da evapotranspiração de referência é o fator de correção c , que pode variar, não só em relação à cultura, mas à região onde está a plantação.

Mas os valores do fator de correção “ c ”, da equação de Penman, abrangem regiões geograficamente grandes, ocasionando diferenças quando se trata de regiões com condições climáticas específicas. É necessário, portanto ter cautela quanto à utilização do método para manejo da irrigação, podendo ocasionar excesso de água no solo, em alguns momentos, afetando a aeração e aumentando a possibilidade de ataque de patógenos, além de ocasionar maior gasto de energia para bombeamento, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura. Em outros momentos, pode haver déficit de água disponível para a cultura, o que pode comprometer a produção.

Para o método do tanque classe A foram encontradas diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% também na primeira semana (estádio VE) e na 6ª semana (estádio V2-V3), apresentando estas diferenças também nas semanas: 8ª(V4-V5); 10ª a 14ª e 17ª semanas,

ou seja, em nove das vinte semanas de estudo, conforme a tabela 2.

Tabela 2 – Comparação da Evapotranspiração da cultura (ET_c, mm) com a evapotranspiração de referência (ET₀) medida por dois métodos indiretos no ano de 2004/2005, ao longo do ciclo da soja, no Distrito Federal.

PERÍODO	DIAS	MÊS	ESTÁDIO	ET _c	ET ₀	
				BALANÇO HÍDRICO	TANQUE CLASSE A	PENMAN
1	8 a 10	Nov	VE	14,5	39,1**	32,1 **
2	15 a 21	Nov	VE-VC	18,5	19,5*	23,5 *
3	22 a 28	Nov	VC-V1	19,3	37,5*	33,2 *
4	29 a 05	Nov/Dez	V1	22,2	26,4*	26,9 *
5	06 a 12	Dez	V1-V2	20,8	29,4*	29,2 *
6	13 a 19	Dez	V2-V3	22,8	14,8**	24,2 *
7	20 a 26	Dez	V3-V4	25,3	27,9*	26,2 *
8	27 a 02	Dez/Jan	V4-V5	26,4	20,7**	25,0 *
9	03 a 09	Jan	V5-V6	27,3	24,2*	25,8 *
10	10 a 16	Jan	V6-V7	27,0	25,8**	26,5 *
11	17 a 23	Jan	V7-R1	34,8	26,6**	26,4 **
12	24 a 30	Jan	R1	33,8	28,2**	27,5 **
13	31 a 06	Jan/Fev	R2	34,1	28,4**	26,2 **
14	07 a 13	Fev	R3	32,8	26,5**	27,0 **
15	14 a 20	Fev	R4	32,1	28,4*	27,6 **
16	21 a 27	Fev	R5	38,8	39,5*	28,6 **
17	28 a 06	Fev/Mar	R6	38,0	20,0**	24,4 *
18	07 a 13	Mar	R7	27,4	24,5*	25,5 *
19	14 a 20	Mar	R8	23,8	23,8*	24,8 *
20	21 a 27	Mar	-	14,0	17,5*	24,0 *

* Não houve diferença significativa ao nível de 5%; ** Houve diferença significativa ao nível de 5%.

Assim como a equação de Penman, o método do tanque classe A variou bastante com relação ao método direto, algumas vezes subestimando, outras superestimando os valores de evapotranspiração. O período em que a ET₀ medida pelo tanque classe A subestimou o método direto coincidiu com o período de maior demanda hídrica da soja, à partir da 10^a

semana, no final do estágio vegetativo e nas fases reprodutivas iniciais.

Essa discrepância pode se dar devido ao ajuste da equação que estabelece o coeficiente do tanque – K_p , que é fixado com base nos dados meteorológicos de uma região e que pode proporcionar estimativas diferentes daquelas observadas com o método direto.

D'ANGIOLLELA (2003), verificou o comportamento da evapotranspiração pelo método do Tanque Classe A na região sul da Bahia, encontrando diferenças significativas entre duas localidades diferentes, utilizando como padrão o método de Penman. Ele explica que esta discrepância se deve provavelmente às condições climáticas diferenciadas de cada localidade testada, como a umidade e o vento, que exercem influência na equação do Tanque Classe A.

SEDIYAMA (1988), afirma que este método, apesar de ser mundialmente utilizado devido à sua fácil operacionalidade e baixo custo, apresenta o inconveniente de ser instalado acima do nível do solo, recebendo radiação nas paredes e no fundo, além de seu pequeno diâmetro intensificar a influência dos processos advectivos. Todos estes fatores devem ser levados em consideração na avaliação do desempenho do tanque classe A.

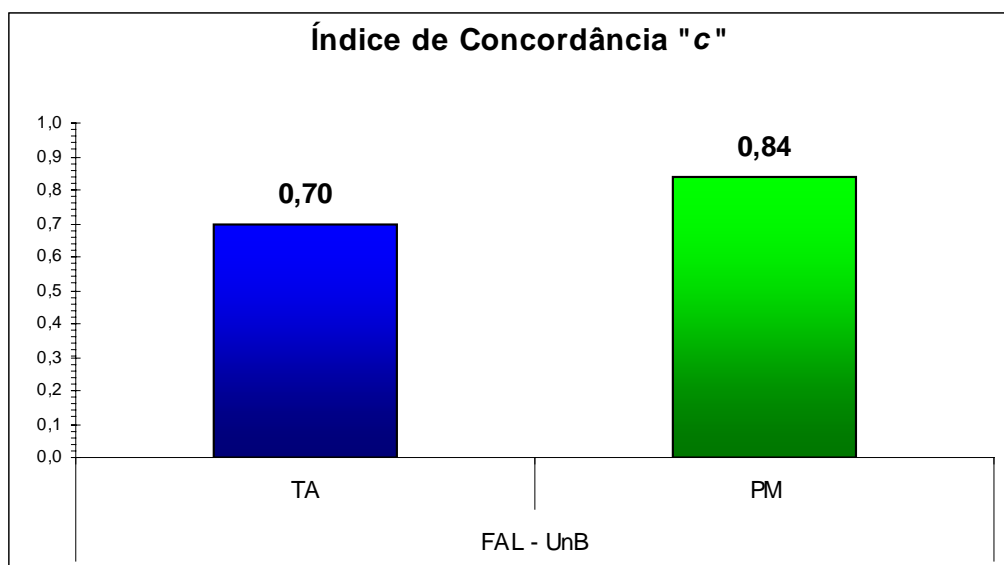


Figura 1 - Classificação do desempenho, pelo coeficiente “c”, dos métodos do tanque classe A (TA) e da equação de Penman (PM), com relação ao método direto da sonda de nêutrons, para o Distrito Federal.

A comparação dos resultados obtidos semanalmente pelos métodos indiretos (figura 1), avaliados pelo índice de confiança “c” demonstrou que o método de Penman apresentou melhor desempenho semanal quando comparado com o tanque classe A, tendo como padrão o

método do balanço hídrico, tendo obtido índice de 0,84 (muito bom) para o período estudado.

Para o Tanque Classe A, os índices semanais foram, em média de 0,70 (bom), mostrando uma boa correlação com o método direto, ainda que inferior ao obtido pela equação. Concorrem para estes resultados alguns fatores, como: diferença de albedo entre a vegetação e o tanque (a vegetação tem albedo maior que a água, resultando em menos energia disponível para conversão em calor latente). A maior rugosidade da vegetação aumenta a turbulência e o transporte atmosférico, compensando em parte a redução em energia absorvida. E por fim a resistência estomática limita a transferência de água para a atmosfera, o que não acontece no tanque (VILLA NOVA et al., 1997).

CAMARGO & SENTELHAS (1989) descrevem resultados mais próximos da evapotranspiração de referência quando o Tanque Classe A foi enterrado e a superfície da água ficou no mesmo nível da grama externa.

CONCLUSÕES

- O comportamento da evapotranspiração de referência, pela equação de Penman somente teve diferença significativa em sete das vinte semanas monitoradas, coincidindo com aquelas de maior demanda hídrica por parte da cultura.
- O método de Penman apresentou melhor desempenho semanal medido pelo teste de Willmott, com relação ao tanque classe A, tendo como padrão o método do balanço hídrico, que obteve o índice de 0,84 (muito bom) para o período estudado;
- O comportamento da evapotranspiração de referência, medida pelo tanque classe A apresentou diferença significativa em nove das vinte semanas monitoradas, coincidindo com aquelas de maior demanda hídrica por parte da cultura.
- O método do Tanque Classe A variou bastante com relação ao método direto, algumas vezes subestimando, outras superestimando os valores de evapotranspiração. Os índices semanais medidos pelo teste de Willmott foram, em média de 0,70 (bom), mostrando uma boa correlação com o método direto, ainda que inferior aos da equação de Penman.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, p. 650-662, 1989.

AMORIM, M.;SEDIYAMA, G. E.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe A e do método de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2001. 938p.

ARANTES, N.E. e MIRANDA, M.A.C. **Cultura da soja no cerrado**. Editado por Neylson Arantes e Plínio Itamar de M. Souza. Capítulo VII, p. 209-224. Piracicaba: POTAFOS, 2000.

ATLAS DO DISTRITO FEDERAL II. Brasília: **CODEPLAN**, 1984. 381 P.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, 595 p., 1989.

BUTLER, D.R.; MIRANDA, R.A.C. Comparação entre os métodos de Penman e Thornthwaite para calcular a evapotranspiração potencial no Sudeste da Bahia. **Revista Theobroma**, Ilhéus, v.14(2), p. 127-133, 1984.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação sazonal de métodos para estimativa da evapotranspiração potencial em Lavras, Estado de Minas Gerais. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió, AL. **Anais...** Maceió: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. 491 p.

CAMARGO, A.P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, Boletim n.161, p. 1-51, 1966.

CASTRO NETO, P.; SOARES, A.M. Avaliação sazonal de métodos para estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p-89-97, 1997.

D'ANGIOLELLA, G.L.B. **Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência e cálculo de balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia**. 2003. 75p. Tese (Mestrado), Faculdade de Agronomia de Medicina Veterinária, FAV- UnB, Brasília.

DI LASCIO, V. L., FERREIRA, R. S. A. e PRAÇA, L. B. Avaliação do Evapotranspiração das Culturas do Feijão (*Phaseolus vulgaris*) e Ervilha (*Pisum sativum* L) Irrigadas no Centro Oeste Brasileiro. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, Belo Horizonte. 12-25 de outubro. **Anais...**, p. 766 – 769, 1994.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Las necesidades de água de los cultivos**. Roma: FAO, 1979.

ENCARNAÇÃO, C.R.R.; VILLA NOVA, N.A. Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) cv “Goiano Precoce”. Pesquisa Agropecuária Pernambucana, Recife, v.4, p. 21-28, 1980.

FEHR, W.R.; CAVINESS, H.E.; HARWOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycyne max* (L.) Merrill. **Crop Science**, Madison, n.6, p. 929-931, Nov/Dec. 1971.

FERREIRA, A.; PEREIRA, A.F. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) em Cruz das Almas, BA. Cruz das Almas: UFBA, 1998. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia, 1998.

FERREIRA, R. S & VASCONCELLOS, V.L.D. Estudo da Evapotranspiração de Referência para a Região do Distrito Federal. 48º Reunião Anual – SBPC. São Paulo, 7 a 12 de julho. **Anais...**, vol. II p. 3 – 4, 1996.

LUNARDI, D.; LUNARDI, M. Influência da umidade da superfície do solo na evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12, REUNIÃO LATINO-

AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Fortaleza, CE. **Anais...**, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2001. 938p.

MAIA, A.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; OLIVEIRA FILHO, F. Variação anual da ET_0 pelos métodos de Penman-Monteith-FAO e tanque classe A, durante 27 anos de observação em Mossoró-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, 1999, Florianópolis: **Anais...**, Florianópolis: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999.

MENDES, R.S. VASCONCELLOS, V. L. D. Estudo da evapotranspiração de referência para a região do Distrito Federal. In: Congresso de Iniciação Científica da UnB, 7, 2002, Brasília – DF. **Anais...**, 25p.

MENDES, R.S.; VASCONCELLOS, V.L.D; D'ANGIOLELLA, G.L.B; FALCÃO, T.C.C. Avaliação de métodos para o cálculo da evapotranspiração de referência no núcleo rural da Vargem Bonita, Distrito Federal. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004. Fortaleza: Meteorologia e Desenvolvimento sustentável, 2004. **CD-Rom**.

MOREIRA, H.J.C. **Manual prático para o manejo da irrigação**. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação – SENIR, Projeto BRA/87/008 – PNUD/OMN. Brasília, 86 p., 1992.

MOTA, F.S. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo: Nobel, 376 p., 1989.

MOTA, F.S.; BEIRSDORF, M.I.C. Medidas e estimativas da evapotranspiração potencial em Pelotas, Rio Grande do Sul. **Ciência e Cultura**, v.28, n.6, p.666-672, 1976.

PEREIRA, F.A. et al. Desempenho da estimativa da evapotranspiração de referência utilizando diferentes coeficientes de tanque classe A em relação a um lisímetro de pesagem. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2001. 938p.

REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. Editora Manuele Ltda. São Paulo, 198p. 1987.

ROBINSON, J.M; HUBBARD, K.G. Soil water assessment model for several crops in the high plains. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, p.1141-1148, 1990.

SANTOS, O.D.; BERGAMASCHI, H.; CUNHA, G.H. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração máxima da alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.2, n.1,p.37-42, 1994.

SEDIYAMA, G. **Necessidade de água para os cultivos**. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSINO AGRICOLA SUPERIOR. Brasília: Curso de engenharia de irrigação, módulo 4. 1988. p. 238-249.

SERRA, D.D.; VASCONCELLOS, V.L.D. **Controle da evapotranspiração na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris*)**. IN: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5, UnB – CNPq. Brasília, DF, 2000.

SILVA, V. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos Penman-Monteith-FAO/56, Hargreaves e tanque classe A em períodos diários e semanais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2001. 938p.

SORIANO, B.M.A.; PEREIRA, A.R. Estimativa da evapotranspiração de referência para a sub-região de Nhecolândia, pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, p. 123-129, 1993.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. EMBRAPA, CNPAF. Goiânia. 49 p. 1995.

VASCONCELLOS, V.L.D.; SERRA, D.D.; FERREIRA, R.S.A.; D'ANGIOLELLA, G.L.B. . **Controle da evapotranspiração na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris*)**IN: CONGRESSO

BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004. Fortaleza: Meteorologia e Desenvolvimento sustentável, 2004. **CD-Rom**.

VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. 1ª.ed. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.