



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

**COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE PENMAN MONTEITH  
ORIGINAL E DA RAZÃO DE BOWEN PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E DO COEFICIENTE DE  
CULTIVO DA SOJA (*Glycine max*)**

**Henrique Luis Pierdoná**

Brasília - DF

Julho de 2016

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

**COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE PENMAN MONTEITH  
ORIGINAL E DA RAZÃO DE BOWEN PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E DO COEFICIENTE DE  
CULTIVO DA SOJA (*Glycine max*)**

**HENRIQUE LUIS PIERDONÁ**

**Orientador: Dr. CÍCERO LOPES DA SILVA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Brasília - DF

Julho de 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

Pierdoná, Henrique Luis

Comparação dos métodos de Penman Monteith original e da razão de Bowen para estimativa da evapotranspiração da cultura e do coeficiente de cultivo da soja (*Glycine max*). Henrique Luis Pierdoná; orientador Cícero Lopes da Silva. - Brasília, 2016. 48 f.

Monografia de Graduação (G) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2016.

1. Evapotranspiração real.
  2. Fluxo de calor latente.
  3. Penman-Monteith original.
  4. Razão de Bowen.
- I. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

### CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Henrique Luis Pierdoná

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO: Comparação dos métodos de Penman Monteith original e da razão de Bowen para estimativa da evapotranspiração da cultura e do coeficiente de cultivo da soja (*Glycine max*).

GRAU: Bacharel ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação 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 monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

HENRIQUE LUIS PIERDONÁ

hl.2000@hotmail.com

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

**COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE PENMAN MONTEITH  
ORIGINAL E DA RAZÃO DE BOWEN PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E DO COEFICIENTE DE  
CULTIVO DA SOJA (*Glycine max*)**

**HENRIQUE LUIS PIERDONÁ**

12/0032112

**Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.**

APROVADA EM BRASÍLIA, 07 DE JULHO DE 2016 POR:

---

Dr. CÍCERO LOPES DA SILVA (ORIENTADOR)

Professor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB

---

Dr. DELVIO SANDRI (EXAMINADOR INTERNO)

Professor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB

---

Dra. SELMA REGINA MAGGIOTTO (EXAMINADORA INTERNA)

Professora da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB

Dedico este trabalho a  
meus amigos e familiares.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sempre estar presente em minha vida, iluminando meus caminhos.

Aos meus pais João Carlos Pierdoná e Maria Magnória Pierdoná, pelo amor e apoio para que eu realize meus sonhos.

À minha irmã Natália Pierdoná, por me incentivar e compreender minhas inquietações durante todos os anos de graduação.

Ao meu orientador Cícero Lopes da Silva, pela confiança em mim e empenho destinado à elaboração deste trabalho.

Agradeço também a toda equipe de trabalho da Agência Nacional de Águas que me apoiou e incentivou no desenvolvimento deste trabalho, em fundamental ao Doutor Morris Scherer Warren pela paciência e ensinamentos.

Pelos dados cedidos e incentivo ao trabalho agradeço também ao Doutor Lineu Neiva Rodrigues, pesquisador da Embrapa Cerrados.

A toda a equipe do Centro Acadêmico de Agronomia que me proporcionou um grande crescimento pessoal enquanto fiz parte de sua gestão.

Também a todos os familiares, amigos e professores que de alguma forma fizeram parte de minha trajetória e formação como Engenheiro Agrônomo.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS .....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	6
3.1 Definição da área experimental .....	6
3.2 Equações usadas para o cálculo da evapotranspiração pela razão de Bowen.....	8
3.3 Equações usadas para o cálculo da evapotranspiração por Penman-Monteith original .....	12
3.4 Quantidade de água no solo .....	14
3.5 Caracterização da curva de IAF .....	14
3.6 Comparação entre os valores de ET <sub>pc</sub> calculados pelos métodos de Penman-Monteith original e pela Razão de Bowen.....	15
3.7 Determinação da curva K <sub>c</sub> .....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1 Resultados Gerais .....	18
4.2 Correlação dos valores de LE entre estações na área do pivô .....	20
4.3 Variação do Índice de Área foliar (IAF).....	21
4.4 Variação da resistência superficial (r <sub>s</sub> ) conforme o ciclo da cultura .....	22
4.5 Comparação entre o método da Razão de Bowen e o método de Penman-Monteith original. ....	23
4.6 Comportamento do coeficiente de cultivo em função dos métodos de Penman-Monteith original e da Razão de Bowen .....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
7. ANEXOS .....	34

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Disposição das estações automáticas no interior do pivô central localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de novembro de 2015 a fevereiro de 2016. Fonte: Google Earth, 10 de julho de 2011. .... 7
- Figura 2.** Estação meteorológica e seus respectivos sensores no interior do pivô, uma semana após o plantio da cultura da soja, em novembro de 2015 (A). Pluviômetro instalado a 3 metros da estação (B). .... 7
- Figura 3.** Ilustração das fases de desenvolvimento da cultura da soja sob um pivô central na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de novembro a fevereiro. Fase de desenvolvimento da cultura aos 10, 16, 30, 44, 51, 72, 86, 101, 109 dias após o plantio, respectivamente em A, B, C, D, E, F, G, H e I. .... 8
- Figura 4.** Fotografia das folhas sobre fundo branco (A) e imagem após ser processada com a conversão em pixels azuis e amarelos (B). .... 15
- Figura 5.** Localização espacial e distâncias entre as estações automáticas de Brasília-DF e Luziânia-GO (INMET), e do pivô para irrigação de soja usado no presente trabalho. .... 17
- Figura 6.** Frequência observada para diversos conteúdos de água no solo. .... 20
- Figura 7.** Correlação dos valores de fluxo de calor latente entre as estações automáticas 1 e 2, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de novembro de 2015 e fevereiro de 2016. Dados com intervalo de 10 minutos. .... 21
- Figura 8.** Evolução da curva do Índice de Área Foliar da cultura da Soja no ano agrícola de 2015/2016 na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Brasília – DF. .... 22
- Figura 9.** Comportamento da resistência superficial da cultura da soja ao longo de seu desenvolvimento. .... 23

<b>Figura 10.</b> Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados pelo método de Penman-Monteith original e o método da Razão de Bowen. Em contraste com a reta de correlação perfeita entre os dois eixos. ....	24
<b>Figura 11.</b> Curva do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da cultura da Soja com $ET_{pc}$ medida pelo método Penman-Monteith original. ....	26
<b>Figura 12.</b> Curva do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da cultura da Soja com $ET_{pc}$ calculada pelo método da Razão de Bowen. ....	26
<b>Figura 13.</b> Média dos coeficientes de cultura em três estádios de desenvolvimento da cultura da soja (inicial até 19 DAS, intermediário dos 49 aos 89 DAS, e final a partir dos 99 DAS) usando os dois métodos de cálculo da evapotranspiração, usados neste trabalho. Ilustra-se também a ligação entre esses estágios.....	27

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Desempenho do índice “c” .....	16
<b>Tabela 2.</b> Entradas de água da chuva mais irrigação e evapotranspiração reais calculada pelo método Penman-Monteith original (PNMO) e pela Razão de Bowen na área do pivô central. ....	18
<b>Tabela 3.</b> Médias de conteúdo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) por data de medida e média mensal. ....	19
<b>Tabela 4.</b> Valores do coeficiente de cultivo encontrados na literatura comparados aos calculados neste trabalho pelo método de Penman-Monteith original e pela Razão de Bowen. ....	25

# COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE PENMAN MONTEITH ORIGINAL E DA RAZÃO DE BOWEN PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E DO COEFICIENTE DE CULTIVO DA SOJA

Autor: HENRIQUE LUIS PIERDONÁ

Orientador: CÍCERO LOPES DA SILVA

## RESUMO

Uma vez que os recursos hídricos se tornam cada vez mais escassos, a adoção de um método adequado para estimativa da evapotranspiração poderá contribuir para o uso racional da água na agricultura irrigada, auxiliando a diminuir os altos custos da irrigação. Dessa forma, este trabalho teve como principal objetivo comparar os resultados de evapotranspiração calculados pelo método de Penman-Monteith original com o método da razão de Bowen na cultura da soja, cultivada sob pivô central na região do Programa de Assentamento Dirigido, PAD-DF, Distrito Federal. A comparação das curvas do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) geradas pelos dois métodos também foi realizada. Os dados climáticos necessários para a determinação da evapotranspiração real e do coeficiente  $K_c$  foram fornecidos por duas estações automáticas instaladas a distâncias de 60 m e 310 m do centro da área irrigada. Os dados da disponibilidade de água no solo foram disponibilizados pela Embrapa Cerrados. A determinação da evapotranspiração de referência necessária para o cálculo do coeficiente  $K_c$  foi realizada pela equação Penman-Monteith FAO, por meio do software REF-ET. A evapotranspiração real estimada pela razão de Bowen apresentou desempenho classificado como mediano em relação aos estimados por Penman-Monteith original. O  $K_c$  estimado em função do método de Penman-Monteith original resultou em valores mais próximos aos da literatura especializada.

**Palavras-chave:** *Glycine max*, fluxo de calor latente, evapotranspiração real, Penman-Monteith original.

# COMPARISON OF METHODS PENMAN MONTEITH ORIGINAL AND BOWEN REASON TO ESTIMATE EVAPOTRANSPIRATION CULTURE AND COEFFICIENT OF SOYBEAN CULTURE

Author: HENRIQUE LUIS PIERDONÁ

Adviser: CÍCERO LOPES DA SILVA

## ABSTRACT

Since water resources become increasingly scarce, the adoption of an appropriate method for estimating evapotranspiration can contribute to the rational use of water in irrigated agriculture, and helping to reduce the high costs of irrigation. Thus, this study aimed to compare the results of evapotranspiration calculated by the original Penman-Monteith method with the Bowen ratio method in soybean under a central pivot in the Settlement Program Directed, PAD-DF region, Federal District. A comparison of crop coefficient curves ( $K_c$ ) generated by the two methods was also performed. Climatic data needed to determine the actual evapotranspiration and  $K_c$  coefficient were provided by two automatic stations installed at distances of 60 m and 310 m from the center of the irrigated area. The water amount data in the soil were provided by Embrapa Cerrados. The determination of the reference evapotranspiration necessary to calculate the coefficients  $K_c$  was performed by FAO Penman-Monteith equation, by the REF-ET software. The evapotranspiration calculated by Bowen ratio showed average results larger than those compared generated by the original Penman-Monteith. The  $K_c$  calculated on the original Penman-Monteith method resulted in values more compatible with the literature.

**Keywords:** *Glycine max*, latent heat flux, actual evapotranspiration, original Penman-Monteith.

# 1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo da irrigação é fornecer água às culturas de maneira a atender as exigências hídricas durante todo o seu ciclo, possibilitando altas produtividades e produtos de qualidade adequada. A quantidade de água necessária às culturas é função da espécie cultivada, da produtividade desejada, do local de cultivo, do estágio de desenvolvimento da cultura, do tipo de solo e da época de plantio (BERNARDO, 1997).

O uso da irrigação no Brasil tem ocorrido entre outros motivos como forma de seguro agrícola, pois garante a produção mesmo em anos atípicos; além disso tem contribuído para o aumento da produção sem a necessidade de expansão de áreas agrícolas, contribuindo para reduzir os desmatamentos.

Os dados de área irrigada por cultura segundo a Agência Nacional de Águas destacam a soja na terceira posição entre as culturas com mais área irrigada no país, com cerca de 624 mil hectares, ficando atrás da cana-de-açúcar (1,7 milhão de hectares) e do arroz em casca (1,1 milhão de hectares). (ANA, 2013, p. 1)

O complexo de soja (*Glycine max*) é o principal gerador de divisas cambiais do Brasil, com negociações anuais que ultrapassam 20 bilhões de dólares (MAPA, 2016). Em 2019, a produção nacional deve representar 40% do comércio mundial do grão e 73% do óleo de soja.

Embora ostentando uma posição privilegiada perante a maioria dos países, com cerca de 12% da água doce superficial disponível no mundo, o Brasil por muito tempo permaneceu sem dar a devida importância ao uso e à preservação de seus recursos hídricos e, conseqüentemente, muitas providências deixaram de ser tomadas. Busca-se agora, estratégias para aproveitar de forma racional as potencialidades hídricas de que o país dispõe.

No entanto, por ser a irrigação responsável pelo uso de cerca de 70% das águas derivadas dos recursos hídricos (ANA, 2013, p. 1) a atividade é muitas vezes apontada como responsável pela crise de água e neste íterim cabe à pesquisa o desenvolvimento de técnicas para o manejo racional das áreas irrigadas.

Uma vez que esse recurso se torna cada vez mais escasso, a adoção de um método adequado para estimativa da evapotranspiração poderá contribuir para o uso racional da água na agricultura irrigada.

No manejo adequado da irrigação o conhecimento das taxas de evapotranspiração é fundamental. Evapotranspiração é o termo que foi utilizado por Thornthwaite, no início da década de 40, para expressar a ocorrência simultânea da transpiração da planta e a evaporação da água presente no solo. A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia solar, pelas condições aerodinâmicas da atmosfera, pelo suprimento de água no solo e pela densidade e arquitetura foliar dos cultivos. A disponibilidade de energia solar depende do local (latitude, altitude e topografia da região) e da época do ano (PEREIRA et al., 1997).

A estimativa da evapotranspiração (ET) é de fundamental importância para aplicação em modelos de previsão de crescimento e produção de culturas, bem como para propósitos ecofisiológicos (RANA et al., 2001)

Dentre os métodos disponíveis para tal finalidade, o tanque Classe A é um dos mais acessíveis aos irrigantes. Além de ser de fácil compreensão e uso, esse método tem a vantagem de medir a evaporação de uma superfície de água livre integrando variáveis meteorológicas como a radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, podendo ainda ser facilmente instalado próximo das áreas irrigadas (CUNHA et al., 2013).

Os lisímetros também são bastante úteis na determinação da evapotranspiração, podendo ser o método mais preciso dependendo do tipo de lisímetro e quando instalados corretamente. Esse método consiste em medir a variação de massa de um bloco de solo devido à entrada ou saída de água. Os lisímetros podem apresentar diversos formatos e tamanhos, sendo classificados de acordo com a maneira de medição em: de pesagem, de drenagem, de lençol freático de nível constante e de flutuação (SILVA, 2005).

Existem também várias equações baseadas em dados meteorológicos para cálculo da evapotranspiração, e uma das mais conhecidas é a de Penman-Monteith, que é uma evolução do método de Penman. Além de levar em consideração aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, a equação de Penman-Monteith inclui na sua dedução a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor da água, além da resistência da superfície à transferência de vapor de

água para a atmosfera. Esta equação é recomendada pela FAO como método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) (ALLEN et al., 1998).

Além dos parâmetros aerodinâmicos e termodinâmicos, a equação Penman-Monteith leva em conta o saldo de radiação (R<sub>n</sub>), fluxo de calor no solo (G), temperatura média do ar (T), velocidade do vento tomada a dois metros de altura (U<sub>2</sub>), pressão de vapor de saturação de vapor (e<sub>s</sub>), pressão real de vapor (e<sub>a</sub>), declividade da curva de pressão de vapor ( $\Delta$ ) e o coeficiente psicométrico. Devido à dependência de dados meteorológicos e da difícil aquisição destes por partes dos agricultores, muitas vezes são usados métodos mais simples para a determinação da ET<sub>o</sub> (CARVALHO et al., 2011).

O método Penman-Monteith como usado neste trabalho inclui todos os parâmetros que governam a troca de energia e o correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração) para uma vegetação uniforme e extensa. A maioria dos parâmetros é medida ou podem ser calculados mediante os dados meteorológicos disponíveis, época do ano e latitude do local. A equação original de Penman-Monteith pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração de qualquer cultura conforme resistência superficial específica da mesma, bem como da resistência aerodinâmica do ar que circunda a referida cultura.

O método de Penman e outros combinados podem ser utilizados para intervalos diários. A utilização e recomendação de um método devem ser realizadas com base na sua precisão e praticidade, para isso é necessário avaliar e calibrar os diversos métodos às condições climáticas locais.

Alguns trabalhos (ALLEN et al. 1998; PEREIRA et al., 1997) tem mostrado que o método de Penman-Monteith (PM) é o mais confiável para as estimativas de ET<sub>o</sub>. Segundo Pereira et al. (1997), o método de PM apresenta a vantagem de proporcionar bons resultados tanto em termos horários quanto em diários e também é preferível utilizar o método de PM aos dados lisimétricos quando estes são de qualidade duvidosa.

Outro importante método para a estimativa da evapotranspiração é o balanço de energia baseado na razão de Bowen (BOWEN, 1926), o qual é uma tentativa de se estabelecer uma relação entre os fluxos de calor sensível e latente. O fluxo de calor sensível (H) é a quantidade de energia gasta no

aquecimento diário do ar, enquanto o fluxo de calor latente (LE) é a quantidade de energia requerida para mudar a água da fase líquida para o estado de vapor sem alterar sua temperatura. Esse método pode ser determinado pela multiplicação do coeficiente psicrométrico pelo gradiente de temperatura do ar ( $\Delta T$ ) com relação a pressão de vapor ( $\Delta e$ ) entre os níveis instalados dos sensores de temperatura e umidade.

Dentre as vantagens do método da razão de Bowen, destacam-se a sua simplicidade e apresentação de resultados satisfatórios quando comparados aos lisímetros, por exemplo. Não requer informações a respeito das características aerodinâmicas da superfície de interesse, pode integrar fluxos de calor latente sobre grandes áreas e pode estimar os fluxos em pequena escala de tempo, além de fornecer medições contínuas (TODD et al., 2000).

Silva et al. (2005) estimando a evapotranspiração do capim Tanzânia pelo método da razão de Bowen e do lisímetro de pesagem, constataram que apesar de a evapotranspiração obtida por Bowen ser influenciada pela ausência de diferenças de temperatura e umidade em períodos chuvosos, esses valores apresentaram desempenhos satisfatórios.

Nesse contexto, o método de Bowen tem sido usado por diversos autores para a determinação da evapotranspiração (SILVA et al., (2007), SILVA et al., (2011), MUNIZ et al., (2014)). Euser et al. (2014) apresentaram um método para determinação da razão de Bowen no qual foram usados perfis verticais de temperatura de bulbo seco e úmido, sendo esses perfis compostos por cabos de fibra óptica com 13 pontos de medição das temperaturas do ar e pressão de vapor, espaçados 20 cm entre si.

As diferenças entre dois e múltiplos níveis de medição foram visíveis nos valores de Bowen ( $\beta$ ), uma vez que o método de pontos múltiplos permite uma maior confiabilidade das diferenças de temperatura e pressão de vapor em relação ao método constituído por apenas dois níveis. Por outro lado, o método dos dois pontos pode ser usado em aparatos mais simples para serem montados no campo, além de apresentar bons resultados na determinação de LE, desde que não haja fluxo horizontal de massa e calor.

No entanto o método da razão de Bowen tem apresentado alguns problemas em seus resultados os quais deverão ser discutidos no presente trabalho.

## 2. OBJETIVOS

- 1) Comparar os resultados de evapotranspiração calculados pelo método de Penman-Monteith original com o método da razão de Bowen.
- 2) Obtenção e comparação das curvas de coeficiente de cultura ( $K_c$ ) geradas pela razão entre os dois modelos de evapotranspiração e a evapotranspiração de referência calculada com os dados das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Luziânia (A012) e Brasília (A001). Tendo como base a cultura da soja.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Definição da área experimental

O experimento foi realizado na bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, localizada na região do Programa de Assentamento Dirigido do DF (PAD-DF) em uma área com cultura de soja (*Glycine max* cv BMX Desafio RR), sob um pivô central, com área de 90,6 hectares. O centro dessa área é representado pelas coordenadas geográficas 15°54'31,05" S e 47°25'12,94 W, com altitude média de 940 m.

Segundo a classificação climática de W. Köppen, a região apresenta clima do tipo Aw, clima tropical de savana com precipitações de verão.

O plantio da cultura foi realizado no dia 26 de outubro de 2015 e a instalação das duas estações meteorológicas (CR 3000 Measurement and Control System, Campbell Scientific) no dia 05 de novembro de 2015 (Figura 1). As estações forneceram todos os dados necessários ao cálculo da evapotranspiração da cultura para ambos os métodos, bem como a quantidade de chuva e irrigação, e o conteúdo de água no solo.

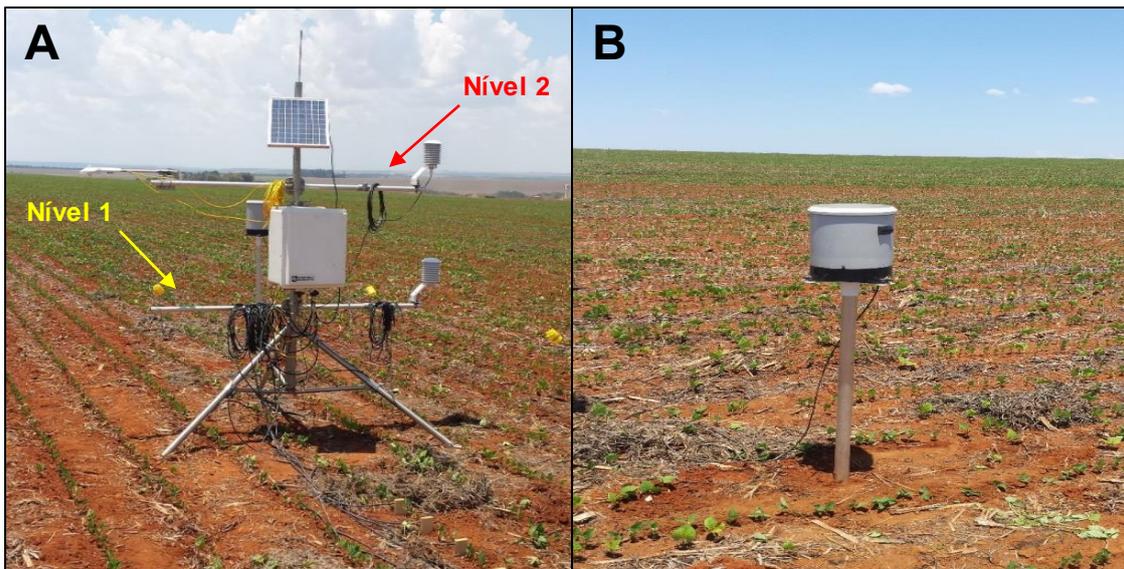
Essas estações consistiram de sensores de umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, e pluviômetros (Figura 2). Os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram instalados a 1,10 m e 1,90 m do nível do solo, correspondendo aos níveis 1 e 2, respectivamente. O saldo de radiação foi obtido por um saldo radiômetro instalado a 1,80 m e as placas de fluxo de calor no solo foram enterradas a 2 cm de profundidade.

A instalação dos pluviômetros objetivou tanto a coleta da água proveniente da irrigação, quanto das precipitações naturais, doravante denominadas entradas de água.

Todos os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (Campbell Scientific, Utah) e programado para o armazenamento dos dados médios no intervalo de 10 minutos.

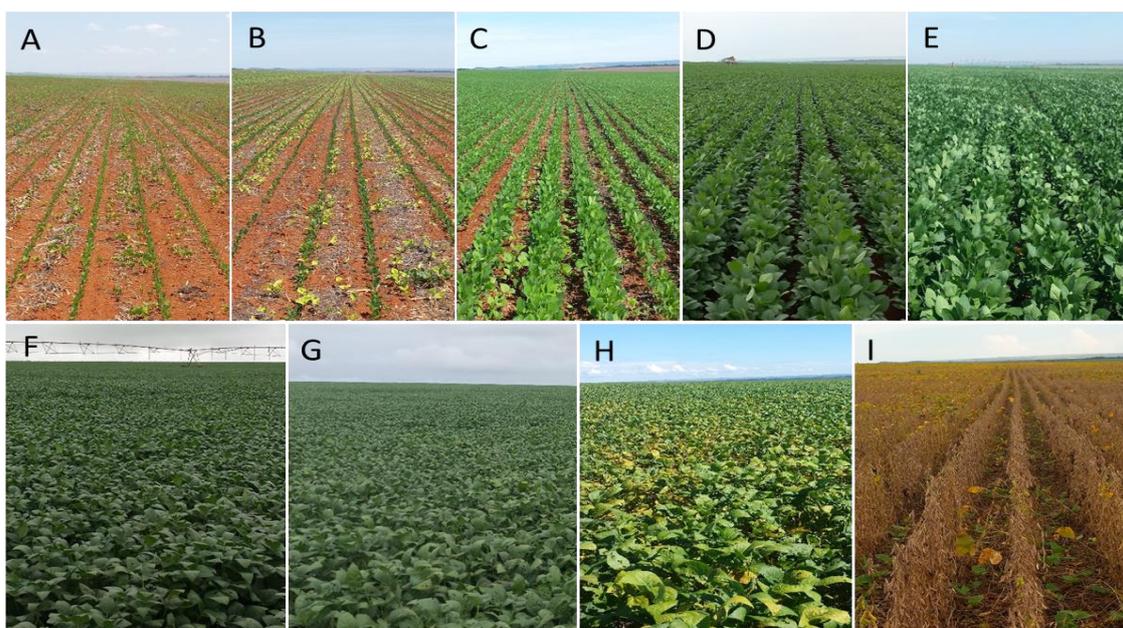


**Figura 1.** Disposição das estações automáticas no interior do pivô central localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de novembro de 2015 a fevereiro de 2016. Fonte: Google Earth, 10 de julho de 2011.



**Figura 2.** Estação meteorológica e seus respectivos sensores no interior do pivô, uma semana após o plantio da cultura da soja, em novembro de 2015 (A). Pluviômetro instalado a 3 metros da estação (B).

Durante o período da coleta dos dados foram realizadas visitas a cada duas semanas para a verificação do funcionamento dos equipamentos, incluindo limpezas e nivelamento dos sensores do saldo de radiação, bem como o acompanhamento do desenvolvimento da cultura, sendo aferidos os dados de altura média da planta, comprimento médio do sistema radicular, e do índice de área foliar e peso foliar  $m^{-2}$ .



**Figura 3.** Ilustração das fases de desenvolvimento da cultura da soja sob um pivô central na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de novembro a fevereiro. Fase de desenvolvimento da cultura aos 10, 16, 30, 44, 51, 72, 86, 101, 109 dias após o plantio, respectivamente em A, B, C, D, E, F, G, H e I.

### **3.2 Equações usadas para o cálculo da evapotranspiração pela razão de Bowen**

Todos os cálculos foram realizados com o auxílio de planilhas Excel, inicialmente usando os dados médios no intervalo de 10 minutos para determinar os valores do fluxo de calor latente. Para a determinação da razão de Bowen ( $\beta$ ), foram usadas as diferenças de temperatura ( $\Delta T$ ) e de pressão real de vapor do ar ( $\Delta e$ ) entre os níveis 1 e 2 conforme descrito anteriormente. As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas Equações 1 e 2. Houve a aplicação de um filtro nos dados coletados que consistia de manter apenas os dados em que as

variações da leitura feita em dois momentos consecutivos ultrapassavam 0,01°C para temperatura e os 0,1% para umidade relativa do ar, justificado pela precisão do equipamento.

$$es = 0,6108 \times \exp \left[ \frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right] \quad (1)$$

$$ea = es \times \frac{UR}{100} \quad (2)$$

Em que:

$es$  – Pressão de vapor do ar saturado de acordo com a temperatura (kPa);

$T$  – Temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

$UR$  – Umidade relativa do ar (%);

$ea$  – Pressão real de vapor do ar (kPa).

Para o cálculo do valor de  $\beta$  foi utilizada a Equação 3, sendo  $\gamma$  o coeficiente psicrométrico considerado igual a 0,0626 kPa °C<sup>-1</sup>.

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3)$$

Em que,

$\Delta e$  – Diferença da pressão real de vapor do ar entre os níveis 1 e 2 (kPa);

$\Delta T$  – Diferença de temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 (°C);

O balanço de energia pelo método da razão de Bowen assume a existência de transporte vertical de massa e calor em uma camada acima da superfície natural rugosa (vegetação), situada a poucos metros da superfície do solo (GOMIDE, 1998). Casos em que não ocorrem diferenças de temperatura e pressão real de vapor entre os níveis, indicam a inexistência do transporte vertical requerido.

Além do método depender da condição citada acima, depende também da precisão das medições das variáveis entre os níveis 1 e 2 (PEREZ et al., 1999). Dessa forma, eventuais situações não compatíveis ao transporte vertical de massa e calor ou imprecisões nos instrumentos de medição favorecem valores errôneos de  $\beta$ , causando consequentemente fluxos de calor sensível e latente inconsistentes.

Para a exclusão dos valores inconsistentes de  $\beta$  foram utilizados três critérios para filtragem dos dados. O primeiro critério foi de acordo com Payero et al. (2003), em que o resultado da equação 4 deve ser maior que zero para que  $\beta$  seja aceito. A segunda condição para aceitação dos valores de  $\beta$  foi realizada de acordo com Ortega-Farias e Cuenca (1996) e Unland et al. (1996), em que  $\beta$  dentro do intervalo  $-1,3 < \beta < -0,7$  são descartados. Assim, além da filtragem, eliminou-se aqueles próximos e iguais a  $-1$ , os quais inviabilizariam o uso da equação 5.

Por fim utilizou-se de um terceiro filtro para a exclusão dos valores de calor latente negativos no período entre 07 horas e 19 horas, admitindo que os valores negativos resultantes de  $\beta$  dentro deste período sejam advindos de momentos de condensação, em virtude das precipitações e eventuais irrigações, portanto não devem ser usados para os cálculos de evapotranspiração, evitando assim a propagação de erros.

Após a filtragem descrita anteriormente, determinou-se os valores de LE nos intervalos de dez minutos por meio da equação 5 e posteriormente verificou-se a correlação desses entre as duas estações.

$$\frac{(\lambda(\Delta e + \gamma\Delta T)(Rn - G))}{10^6} > 0 \quad (4)$$

Em que:

$\lambda$  – Calor latente de vaporização da água ( $J\ kg^{-1}$ );

$Rn$  – Saldo de Radiação ( $W\ m^{-2}$ );

$G$  – Fluxo de calor no solo ( $W\ m^{-2}$ );

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (5)$$

Em que:

LE – Fluxo de calor latente ( $W\ m^{-2}$ );

Considerando que os eventos de irrigação ou precipitação poderiam favorecer o aparecimento de dados inconsistentes de LE, os dados anteriores e posteriores, num período de 30 minutos, aos eventos supracitados foram descartados. Com os dados de LE e o calor latente de vaporização da água ( $\lambda$ ) calculado pela Equação 6, foi possível a determinação da evapotranspiração real da cultura por meio da Equação 7.

$$\lambda = (2,501 - (0,00236 \times T)) \times 10^6 \quad (6)$$

$$ETrc = \frac{LE \times 600}{\lambda} \quad (7)$$

Em que:

T – Temperatura do ar no nível 2 ( $^{\circ}C$ );

ETrc – Evapotranspiração real da cultura da soja para um período de tempo igual a 10 minutos (mm);

600 – Tempo em segundos correspondente ao intervalo de 10 minutos.

De posse dos dados de ETrc da cultura para os períodos de 10 minutos, a evapotranspiração foi acumulada diariamente, agrupando os respectivos intervalos de tempo durante todo o ciclo da cultura.

Considerando que não houve qualquer manejo da irrigação no pivô em questão, foi realizada a comparação dos valores de evapotranspiração da soja com as entradas de água em períodos semanais, mensais e de todo o ciclo da cultura. O período total foi de 14 semanas, sendo feita a soma tanto da ETrc calculada pela razão de Bowen e pelo método Penman-Monteith Original quanto das entradas de água reguladas pelo pluviômetro. A primeira semana

compreendeu o período de 05/11/2015 a 11/11/2015, e assim sucessivamente em períodos de 7 dias até a última semana, de 04/02/2016 a 10/02/2016. Do mesmo modo foram realizadas avaliações mensais, constituídas pelos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro.

Há de se considerar que na ausência de déficit de água no solo os valores de  $ET_{rc}$  dados pela Equação 7, correspondem à evapotranspiração potencial da cultura ( $ET_{pc}$ ), pois como a cultura esteve em 86,6% do tempo com condições de água no solo de no mínimo a capacidade de campo os valores estimados de  $ET_{rc}$  são os mesmos da evapotranspiração potencial para cultura da soja.

### 3.3 Equações usadas para o cálculo da evapotranspiração por Penman-Monteith original

Após o cálculo das variáveis a serem descritas posteriormente o cálculo de  $ET_{pc}$  pelo método de Penman-Monteith Original foi feito mediante a equação:

$$ET_{pc} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \left( \frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (8)$$

Para o cálculo do valor da declividade da curva de pressão de vapor ( $\Delta$ ) foi utilizada a Equação 8:

$$\Delta = \frac{4098 \times [0,6108 \times \exp(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3})]}{(T + 237,3)^2} \quad (9)$$

O calor específico do ar  $c_p$  foi considerado  $0,001013 \text{ (MJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}\text{)}$ . Para o cálculo da densidade média do ar usou-se a Equação 10, em que  $P$  é a pressão barométrica referente à altitude do local (942 m):

$$\rho_a = 3,486 \times \frac{P}{(275 \times T)} \quad (10)$$

A resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) foi calculada pela Equação 11.

$$r_a = \frac{\ln \left[ \frac{z_2 - d}{z_{o2}} \right] \ln \left[ \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_2} \quad (11)$$

Em que:

$r_a$  – resistência aerodinâmica [ $s \, m^{-1}$ ],

$z_2$  – altura da medida do vento [m],

$z_h$  – altura da medida da umidade relativa do ar [m],

$d$  – altura de deslocamento do plano zero [m],

$z_{o2}$  – comprimento da rugosidade de transferência de domínio do momentum [m],

$z_{oh}$  – comprimento da rugosidade transferência de domínio de calor e vapor [m],

$k$  – constante de von Karman, 0,41,

$u_2$  – velocidade do vento a altura  $z$  [ $m \, s^{-1}$ ].

Das diversas equações empíricas desenvolvidas para a estimativa de  $d$ ,  $z_{om}$  e  $z_{oh}$  para este trabalho escolheu-se as seguintes;  $d = 2/3 h$ ;  $z_{om} = 0,123h$ ;  $z_{oh} = 0,1z_{om}$  em que  $h$  é a altura da planta. (ALLEN et al, 1998). No presente caso  $h$  variou conforme o desenvolvimento da cultura.

A resistência da superfície, ou estomatal, descreve a resistência ao fluxo de vapor através da passagem pelos estômatos, bem como pela resistência à evaporação na superfície do solo. Na tentativa de buscar uma solução para o uso de um valor o mais próximo do ideal possível para a cultura da soja, utilizou-se o seguinte modelo sugerido por Allen (1986) citado em Pereira et al. (1997, p. 91) onde prevê-se que  $r_s$  pode ser melhor estimada em função do saldo diário de radiação e do índice de área foliar, conforme Equação 12.

$$r_s = \frac{500 - 20,3R_n}{IAF} \quad (12)$$

Em que:

IAF – Índice de Área Foliar ativo (iluminado pelo sol) [ $\text{m}^2$  (área de folha)  $\text{m}^{-2}$  (superfície do solo) ].

$R_n$  – Saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ )

Os cálculos de ET<sub>pc</sub> também foram realizados com o auxílio de planilhas usando o aplicativo Excel. Os dados iniciais gerados pelas estações que estavam no intervalo de 10 minutos foram agrupados até que se chegou a média diária de todos estes valores.

### 3.4 Quantidade de água no solo

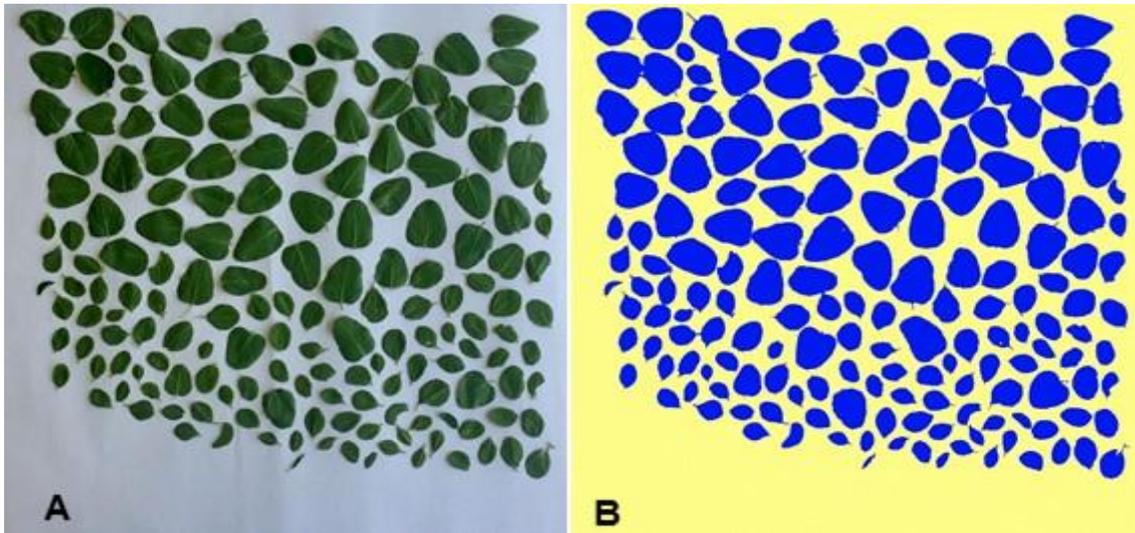
Para verificar o conteúdo de umidade do solo durante o ciclo da cultura da soja em que as amostras foram retiradas às profundidades de 15 cm, 30 cm e 60 cm com duas repetições para cada profundidade nas datas de 19 e 26 de novembro; 2, 9, 16, 23 e 30 de dezembro; 6, 13, 20 e 26 de janeiro; e no dia 2 de fevereiro de 2016, totalizando 12 medições durante o ciclo da cultura, dessas profundidades, para se obter o conteúdo de água no solo considerou-se a média entre os valores verificados a 15 cm e 30 cm.

Foi elaborado um gráfico para analisar a frequência com que o conteúdo de umidade no solo superasse ou igualasse ao conteúdo correspondente a capacidade de campo, no presente estudo considerado  $0,30 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

### 3.5 Caracterização da curva de IAF

O IAF consistiu em demarcar  $1 \text{ m}^2$  de solo e deste foram colhidas todas as folhas de todas as plantas da cultura da soja. Essas folhas foram posicionadas em uma superfície branca, de maneira a não extrapolar uma área quadrada demarcada de  $0,25 \text{ m}^2$  e sem haver sobreposição de folhas. Destas foi tirada uma fotografia e com auxílio do programa MultiSpec Application Version 3.4, convertendo-se os pixels da imagem em apenas duas cores, azul (representando o verde das folhas) e amarelo (representando o plano de fundo

da foto). Esta imagem foi usada pelo programa ArcGis, contabilizando quantos pixels azuis existiam em 0,25 m<sup>2</sup>. Somadas as áreas de folha de todas as fotos obteve-se a área foliar em 1 m<sup>2</sup> de solo e assim obteve-se o índice de área foliar. As coletas das folhas ocorreram em sete amostras em datas diferentes de forma a se obter o Índice de Área Foliar conforme o desenvolvimento da cultura.



**Figura 4.** Fotografia das folhas sobre fundo branco (A) e imagem após ser processada com a conversão em pixels azuis e amarelos (B).

### 3.6 Comparação entre os valores de ET<sub>pc</sub> calculados pelos métodos de Penman-Monteith original e pela Razão de Bowen

Uma forma de comparar o desempenho de um método com outro é por meio do índice de concordância de Willmott (d) (Equação 13), e índice de confiança (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997) (Equação 14) conforme Ide (2016). O índice de Willmott varia de 0 a 1 e estabelece uma concordância entre valores observados e estimados. O índice de confiança (c) também varia de 0 a 1, de modo que para uma condição ideal  $r=d=c=1$ .

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i| + |M_i|)^2} \quad (13)$$

Em que:

E<sub>i</sub> - valores de ET<sub>pc</sub> estimados pelo método da Razão de Bowen;

M<sub>i</sub> - valores de ET<sub>pc</sub> estimados pelo método de Penman-Monteith original;

$\bar{M}$  - média dos valores de ET<sub>pc</sub> estimados pelo método de Penman-Monteith original;

$E'_i$  - diferença entre os valores de ET<sub>pc</sub> encontrados pela Razão de Bowen e a média dos valores de ET<sub>pc</sub> encontrados pelo método de Penman-Monteith original;

$M'_i$  - diferença entre os valores e a média dos eventos.

$$c = r \times d \quad (14)$$

Em que:

c - índice de confiança;

r - coeficiente de correlação;

d - índice de Willmott.

Ressalta-se que nesse trabalho usou-se o mencionado índice de concordância para verificar o desempenho da equação de Bowen, tendo como base a equação de Penman-Monteith Original.

**Tabela 1.** Desempenho do índice “c”.

Valor de “c”	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
<= 0,3	Péssimo

### 3.7 Determinação da curva Kc

Para a determinação da curva de Kc, Allen et al. (1998) indicam a necessidade de uma estação de referência localizada próximo a cultura estudada para que se determinem os valores de evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>). Nestas estações algumas condições devem ser atendidas; a superfície deve ser coberta por grama em crescimento ativo, sem restrição hídrica e com

altura média de 12 cm, assumindo resistência superficial de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23.

Estações meteorológicas que atendem aos requisitos supracitados estavam disponíveis em Brasília e Luziânia sob responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foi verificado que essas estações apresentavam as menores distâncias em relação ao experimento, por isso foram utilizadas, sendo os dados meteorológicos necessários ao cálculo de  $ET_0$ , média conforme a distância dessas estações.

A Figura 5 ilustra a posição geográfica dessas estações com relação à área experimental.



**Figura 5.** Localização espacial e distâncias entre as estações automáticas de Brasília-DF e Luziânia-GO (INMET), e do pivô para irrigação de soja usado no presente trabalho.

De posse dos valores de  $ET_0$  o coeficiente de cultivo durante o ciclo da soja foi determinado pela relação dos valores médios diários de  $ET_{rc}$  calculados pela razão de Bowen e pelo método de Penman-Monteith; e a  $ET_0$  diária determinada pela equação de Penman-Monteith FAO a qual é padronizada para o cálculo da evapotranspiração de referência, com dados das Estações meteorológicas de Brasília-DF (A001) e Luziânia-GO (A012).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados Gerais

O período de avaliação da cultura foi de 99 dias, resultando em um total da ET<sub>pc</sub> estimado por Penman-Monteith original de 354 mm, enquanto que o estimado pela razão de Bowen resultou em 501 mm. Com relação às entradas de água (chuva mais irrigação) verificou-se um total médio de 657 mm, portanto superior aos valores de evapotranspiração. Os valores diários estimados por cada um dos métodos e pela evapotranspiração de referência estão apresentados no Anexo A.

A diferença total entre os métodos de estimativa da evapotranspiração corresponde a 147 mm, o que equivale a 133.182 m<sup>3</sup> de água a serem aplicados a mais na área irrigada (90,6 ha) se o método da Razão de Bowen for o utilizado para os cálculos. Essa diferença de consumo pode gerar custos muito altos ao produtor, ressaltando ainda mais a importância da utilização de um método confiável para o cálculo da evapotranspiração no manejo de áreas irrigadas.

A distribuição das entradas de água e evapotranspiração da cultura na área irrigada durante o período avaliado está explicitado na Tabela 2. Ressalta-se que devido aos pluviômetros usados terem sido instalados na área de abrangência do pivô, impossibilitou-se a separação entre chuvas e irrigações.

**Tabela 2.** Entradas de água da chuva mais irrigação e evapotranspiração reais calculada pelo método Penman-Monteith original (PNMO) e pela Razão de Bowen na área do pivô central.

Mês	Entradas de água (mm)	ET <sub>c</sub> PNMO (mm)	ET <sub>c</sub> Razão de Bowen (mm)
Novembro	131	54	110
Dezembro	115	150	205
Janeiro	380	106	138
Fevereiro	31	44	48
<b>Total</b>	<b>657</b>	<b>354</b>	<b>501</b>

A Tabela 3 mostra as médias da quantidade de água no solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) das 52 amostras distribuídas nas 13 datas, a qual corresponde a profundidade média do sistema radicular da cultura da soja.

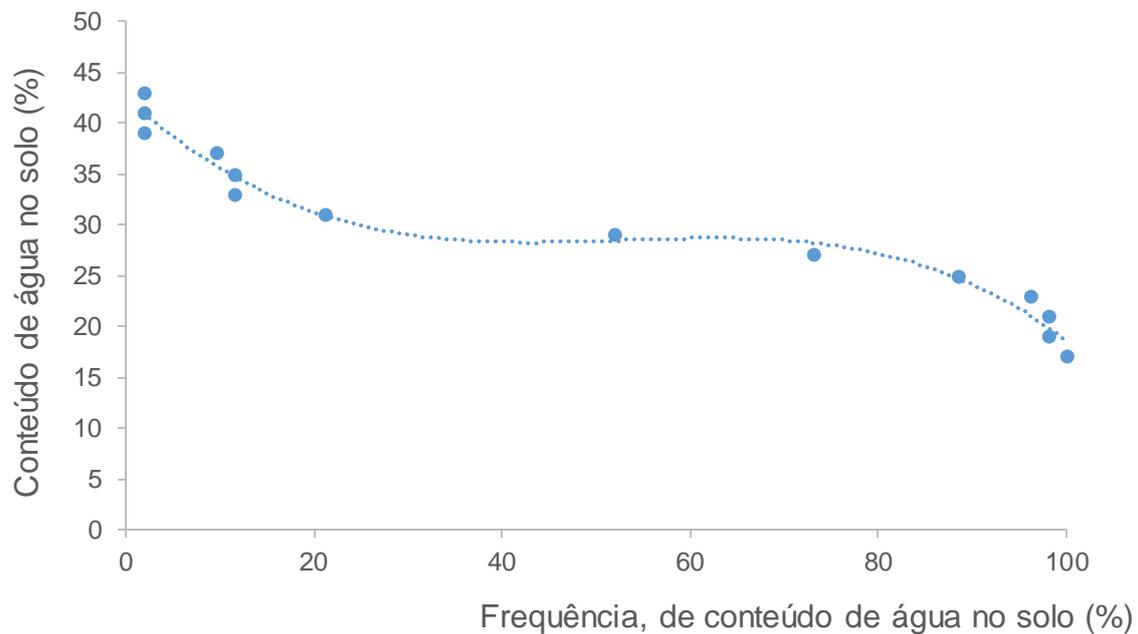
Em dezembro foi o mês em que verificou-se conteúdo de água no solo com valores abaixo da capacidade de campo, que neste caso, foi considerado  $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

**Tabela 3.** Médias de conteúdo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) por data de medida e média mensal.

Mês	Data	Conteúdo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	Média mensal ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )
Novembro	19/11/2015	0,32	0,33
	26/11/2015	0,35	
Dezembro	02/12/2015	0,30	0,30
	09/12/2015	0,26	
	16/12/2015	0,30	
	23/12/2015	0,23	
	30/12/2015	0,38	
Janeiro	06/01/2016	0,34	0,33
	13/01/2016	0,36	
	20/01/2016	0,31	
	26/01/2016	0,32	
Fevereiro	03/02/2016	0,32	0,33
	11/02/2016	0,35	

A frequência do conteúdo de água no solo pode ser verificada pela Figura 6. Segundo dados de Andrade (2011), o conteúdo de água em solos argilosos, no ponto de capacidade de campo em solos desse tipo, está próximo a 30%, logo, tomando esse valor como referência, nota-se que em 86,6% do tempo em que o experimento foi realizado, o conteúdo de água no solo foi igual ou maior que o correspondente à capacidade de campo, sendo assim, infere-se que durante o experimento na maioria das vezes, prevaleceu-se a condição em que

os valores observados de evapotranspiração real dados pela equação de Bowen podem ser considerados como sendo ET<sub>pc</sub>.

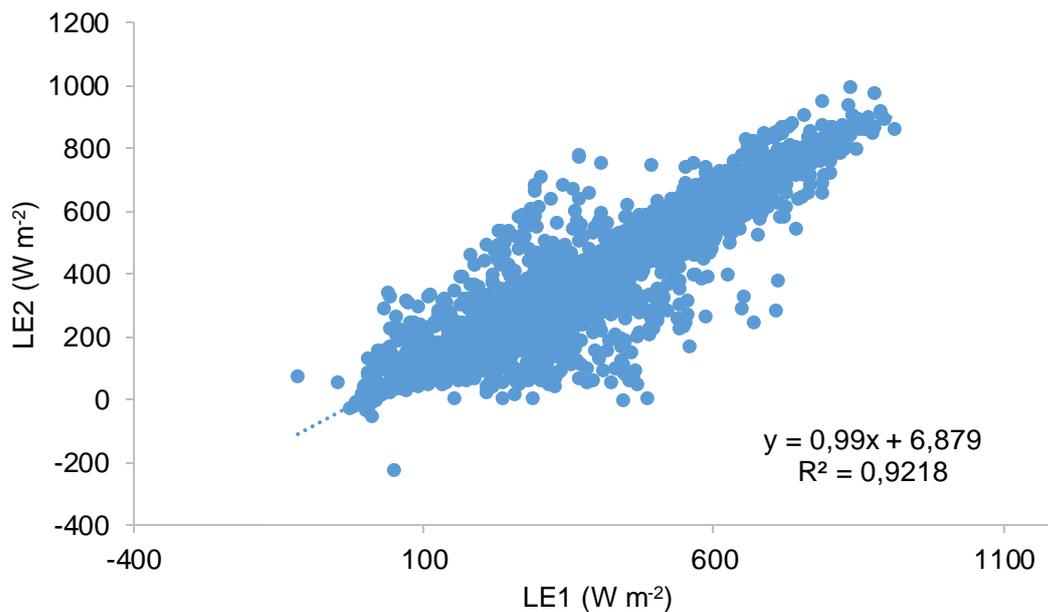


**Figura 6.** Frequência observada para diversos conteúdos de água no solo.

#### 4.2 Correlação dos valores de LE entre estações na área do pivô central

Após a determinação dos resultados do fluxo de calor latente (LE) foi realizada a correlação desses entre as estações. A Figura 7 representa a correlação LE1 x LE2 (Estação 1 x Estação 2). A verificação de que a declividade da reta se aproxima da unidade, e o valor de  $R^2$  é maior que 0,9, demonstrou boa correlação entre os valores de LE para ambas as estações. Esse comportamento é uma boa indicação que o fluxo de calor e de massa ocorreu predominantemente no sentido vertical.

Pelo posicionamento das estações e devido ao movimento angular do pivô, verificou-se que as duas estações não foram sobrepostas por irrigação ao mesmo tempo, ou seja, quando o movimento do pivô foi realizado no sentido horário, a água foi aspergida primeiramente sobre a estação 1 e posteriormente na estação 2, sobrepondo uma de cada vez e contribuindo fortemente para as variações nos valores de LE entre estações no momento da irrigação. Quando o movimento é anti-horário, a ordem da sobreposição é invertida.

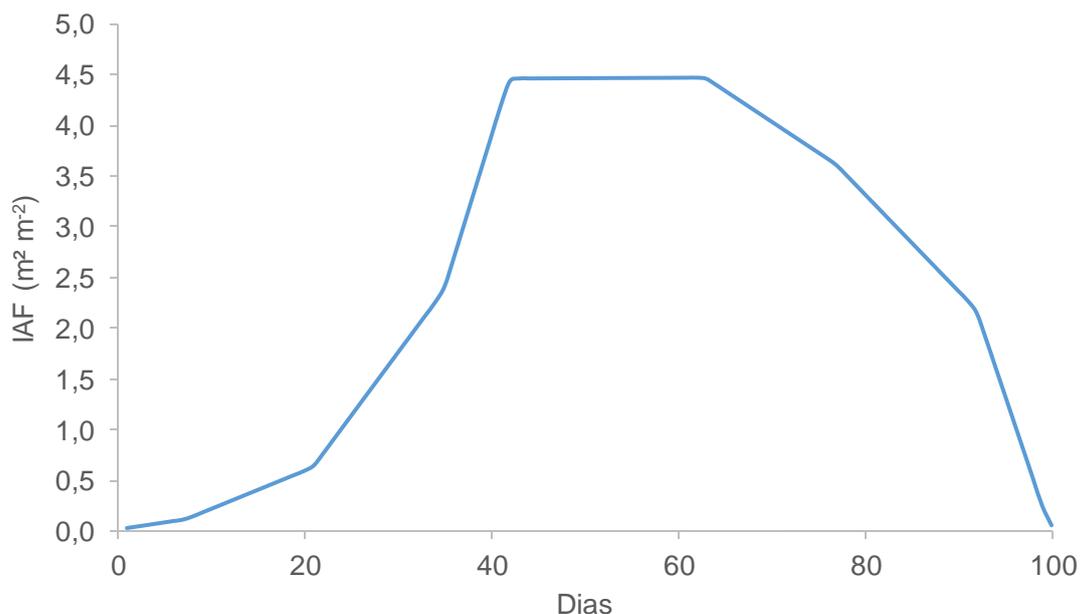


**Figura 7.** Correlação dos valores de fluxo de calor latente entre as estações automáticas 1 e 2, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de novembro de 2015 e fevereiro de 2016. Dados com intervalo de 10 minutos.

Embora o posicionamento das estações possa ter influenciado na variação de alguns resultados de LE pelo fato de que a rotação do pivô fazia com que as estações não estivessem sob irrigação ao mesmo tempo, o coeficiente angular da reta ajustada para a correlação teve seu valor próximo à unidade. O valor de 0,99 indica que as duas variáveis da correlação têm variações quase que da mesma magnitude. Verifica-se também elevado coeficiente de determinação ( $R^2$ ), indicando excelente correlação entre os resultados de LE.

#### 4.3 Variação do Índice de Área foliar (IAF)

A curva representativa do índice de área foliar foi obtida em conformidade com os valores observados no campo, se aproxima muito do comportamento de IAF para a cultura da soja, conforme encontrado por Oliveira et al. (2011) em Planaltina-DF.



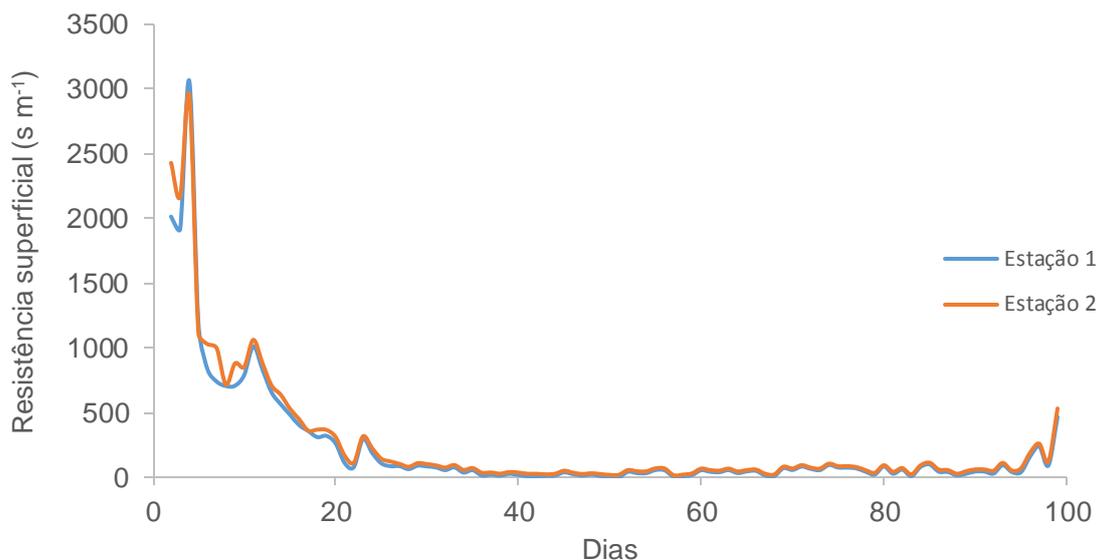
**Figura 8.** Evolução da curva do Índice de Área Foliar da cultura da Soja no ano agrícola de 2015/2016 na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Brasília – DF.

#### 4.4 Variação da resistência superficial ( $r_s$ ) conforme o ciclo da cultura

A variação da resistência superficial da cultura da soja neste estudo foi feita de acordo com os dados calculados para cada dia, como representado na Figura 9.

O estágio inicial de desenvolvimento de 0 a 10 dias apresentou valores altos de resistência superficial devido aos baixos valores do índice de área foliar. No estágio médio de 40 a 80 dias os valores estiveram próximos a  $45 \text{ s m}^{-1}$  e no estágio final de 90 a 100 dias com valores próximos a  $140 \text{ s m}^{-1}$ . Os valores estimados foram usados na equação de Penman-Monteith original.

Como objeto de comparação a estes resultados tem-se que Irmak et al. (2013) usando um modelo desenvolvido para a cultura da soja no estado de Nebraska, EUA, encontrou valores de resistência superficial de  $101 \text{ s m}^{-1}$ ,  $43 \text{ s m}^{-1}$  e  $70 \text{ s m}^{-1}$ , para os estádios inicial, intermediário e final de desenvolvimento da cultura.

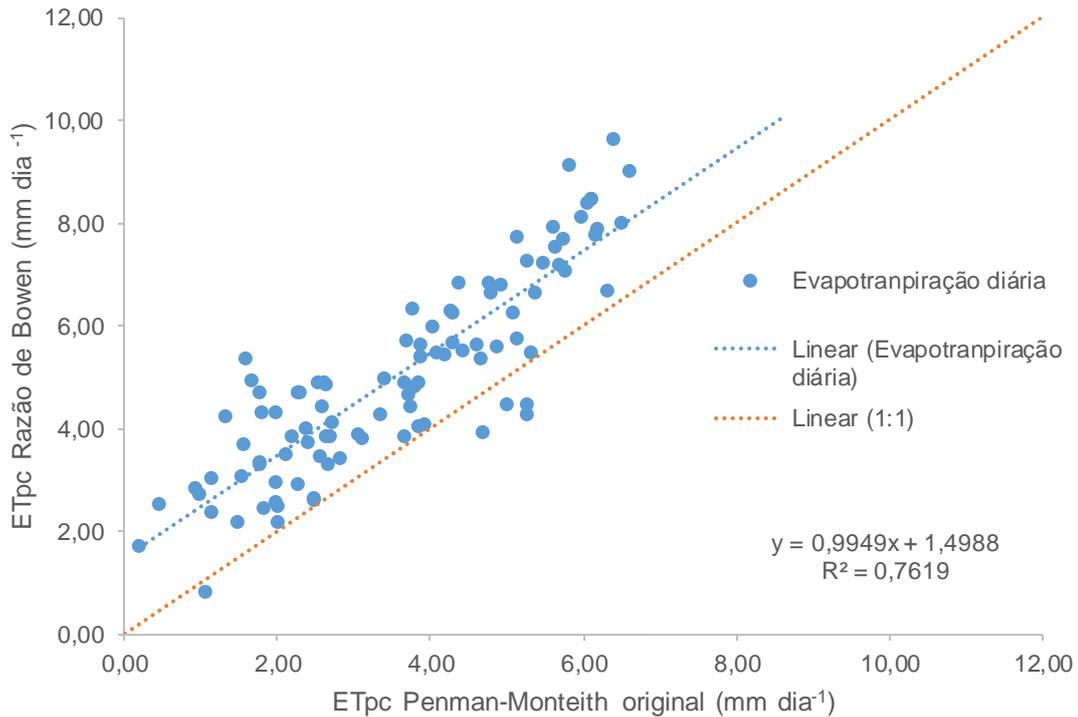


**Figura 9.** Comportamento da resistência superficial da cultura da soja ao longo de seu desenvolvimento.

#### 4.5 Comparação entre o método da Razão de Bowen e o método de Penman-Monteith original.

Como resposta a um dos objetivos deste trabalho foi feita a comparação entre os resultados de evapotranspiração da cultura calculados pelo método de Penman-Monteith original e pelo método da razão de Bowen (Figura 10).

As correlações permitiram a observação da associação linear dos valores encontrados nos dois métodos em que o valor de  $R^2$  foi de 0,76, o valor do coeficiente angular da reta de 0,99 e o coeficiente linear de 1,50; o que indica que o método da Razão de Bowen está superestimando os dados de evapotranspiração em cerca de 1,5 mm para todos os eventos em comparação com o método de Penman-Monteith original.



**Figura 10.** Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados pelo método de Penman-Monteith original e o método da Razão de Bowen. Em contraste com a reta de correlação perfeita entre os dois eixos.

De acordo com Ohmura (1982) existem alguns problemas no uso do método da razão de Bowen. É sabido que este método possibilita a obtenção de dados errôneo em fluxos turbulentos, como por exemplo a confusão entre condensação e evaporação. No entanto este problema possivelmente tenha sido resolvido no presente experimento devido a filtragem dos dados próximos aos eventos de precipitação.

Lopes (1999) verificou erros relativos ao cálculo da razão de Bowen, variando entre -20% a 30% e entre 5% e 10% no cálculo de LE, para períodos de 24 horas.

Com relação ao método de Penman-Monteith original o efeito causado pela falta de mais estudos para definição da resistência superficial na cultura da soja ainda é grande, já que existem diferenças nas propriedades aerodinâmicas entre a grama como cultura de referência e as culturas agrícolas, variando com as condições climáticas, altura e desenvolvimento foliar das mesmas.

Em trabalho realizado por Gomide et al. (2012), foi realizada a comparação entre os métodos de estimativa de evapotranspiração; Penman-Monteith modificada e da Razão de Bowen em cultivo de milho e feijão; e de um modo geral pôde-se concluir que os valores calculados pela equação Penman-Monteith (PM) subestimaram a ET<sub>c</sub> quando comparados com os valores obtidos pela Razão de Bowen (RB).

A equação que relaciona a ET<sub>pc</sub> determinada por PM com a obtida por RB se manteve praticamente paralela à reta 1:1, com uma diferença constante de 45 W m<sup>-2</sup>, provavelmente devido à contribuição de energia advectiva proveniente de áreas externas. No geral, os resultados permitiram concluir que a os valores estimados pela Razão de Bowen superestimaram os dados de ET<sub>c</sub> quando comparados aos valores estimados por Penman Monteith original. (GOMIDE et al., 2012).

Realizados os cálculos do índice de concordância de Willmott (d) e do coeficiente de correlação (r) permite-se concluir que se for tomado como correto os valores calculados pelo método de Penman-Monteith original o método da razão de Bowen apresentou um desempenho mediano (r = 0,87; d = 0,7; c = 0,61).

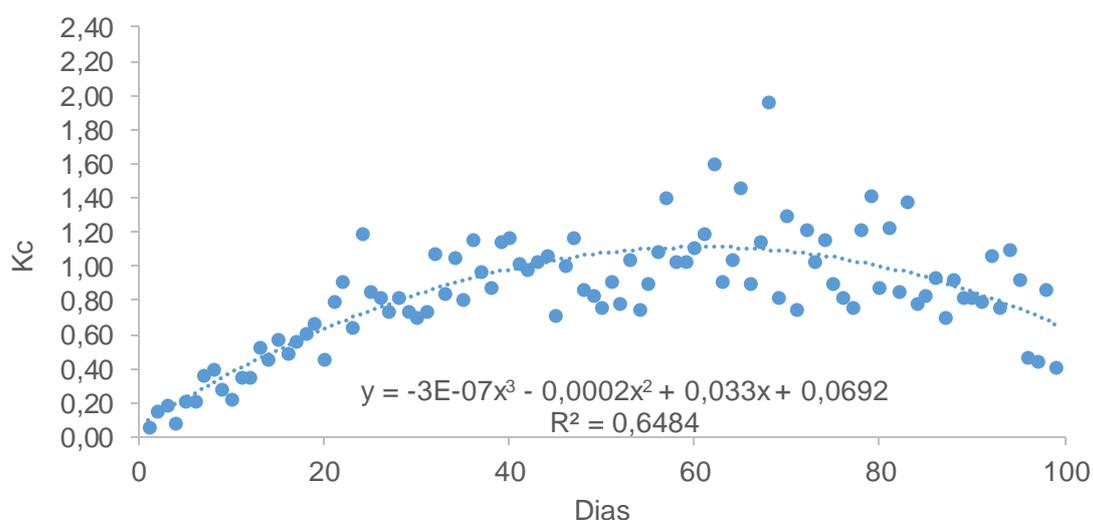
#### 4.6 Comportamento do coeficiente de cultivo em função dos métodos de Penman-Monteith original e da Razão de Bowen

As curvas de K<sub>c</sub> também auxiliam a mostrar as diferenças de comportamento entre os dois métodos usados no cálculo da evapotranspiração da cultura.

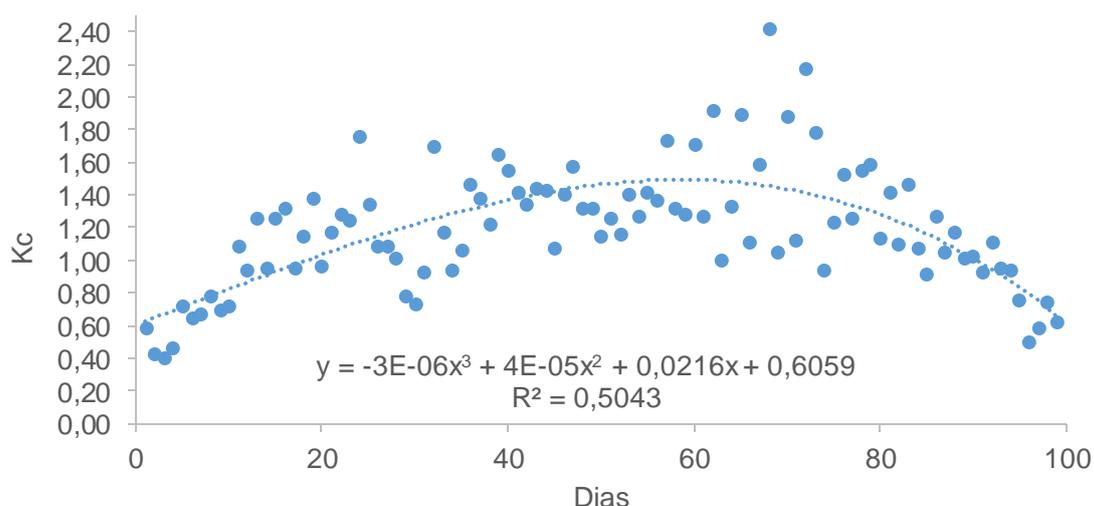
**Tabela 4.** Valores do coeficiente de cultivo encontrados na literatura comparados aos calculados neste trabalho pelo método de Penman-Monteith original e pela Razão de Bowen.

SUBPERÍODO	FAO (1974)	MENDES (2006)	PNMO	BOWEN
<b>INICIAL</b>	0,3	0,58	0,22	0,61
<b>INTERM.</b>	1,0	1,26	1,05	1,43
<b>FINAL</b>	0,5	0,96	0,76	0,81
<b>MÉDIA</b>	0,62	0,96	0,84	1,19

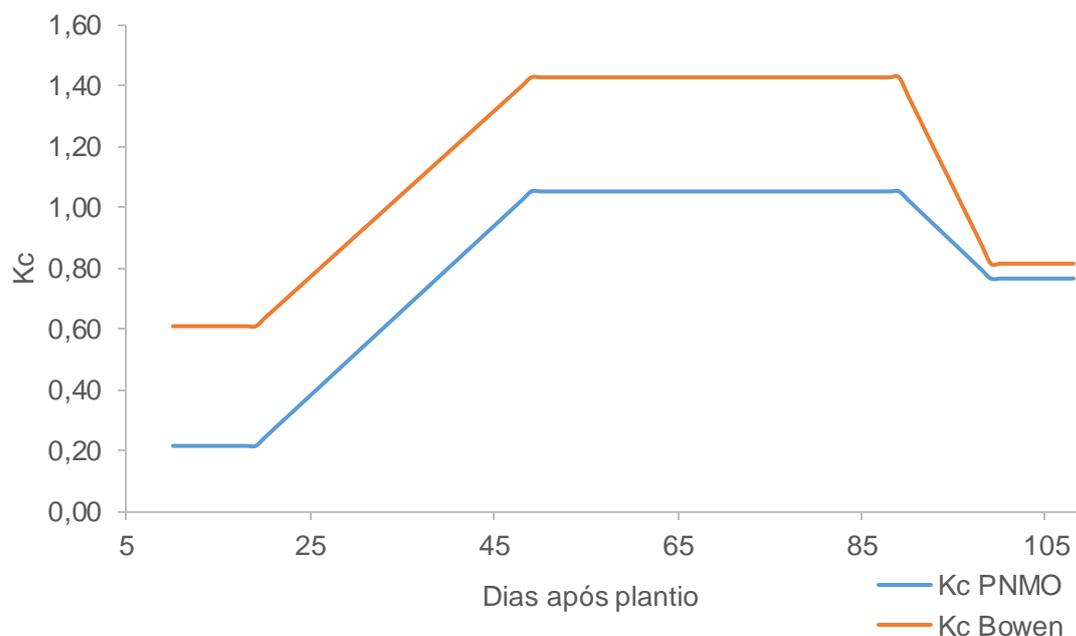
Como observado nas Figuras 11, 12 e 13 os coeficientes de cultivo médios para os dois métodos de cálculo da evapotranspiração; Penman-Monteith original e razão de Bowen para os períodos: inicial (até os 19 DAS); intermediário (dos 49 aos 89 DAS) e final (a partir dos 99 DAS) onde DAS são as iniciais de dias após semeadura; estão ilustrados na Tabela 4. Os subperíodos foram definidos de acordo com o estágio fenológico da planta, sendo inicial até o estágio vegetativo 1 (V1), o intermediário do estágio de produção 2 até o 6 (R2 a R6), e o final do estágio de produção 6 até o fim (R6 em diante).



**Figura 11.** Curva do coeficiente de cultivo (Kc) da cultura da Soja com ETpc medida pelo método Penman-Monteith original.



**Figura 12.** Curva do coeficiente de cultivo (Kc) da cultura da Soja com ETpc calculada pelo método da Razão de Bowen.



**Figura 13.** Média dos coeficientes de cultura em três estágios de desenvolvimento da cultura da soja (inicial até 19 DAS, intermediário dos 49 aos 89 DAS, e final a partir dos 99 DAS) usando os dois métodos de cálculo da evapotranspiração, usados neste trabalho. Ilustra-se também a ligação entre esses estágios.

O Kc na fase inicial do ciclo da cultura também sofre o efeito da frequência de umedecimento da superfície do solo, devido a superfície do solo estar descoberta ou pouco vegetada.

O método de preparo do solo também pode interferir sobre os valores do Kc inicial, normalmente o plantio direto com cobertura morta (restos culturais e palhada) como o realizado neste experimento minimiza a perda de água por evaporação da superfície do solo, o que pode reduzir os valores iniciais de Kc para patamares em torno de 0,4 – 0,5, como encontrados no presente trabalho de 0,22 e 0,61 para os métodos de Penman-Monteith original e razão de Bowen respectivamente.

De acordo com Mendes (2006), o Kc para cultura da soja calculado na safra de 2004/2005 no Distrito Federal obteve valores de 0,58; 1,27 e 0,96 para os estágios iniciais, médios e finais, respectivamente. Já os valores de referência preconizados pela FAO que revelam valores ainda mais baixos, de 0,3; 1,0 e 0,5 respectivamente.

Com isso é possível perceber que assim como ocorrido na determinação da evapotranspiração, o método da razão de Bowen resultou em valores de  $K_c$  superiores aos calculados pelo método de Penman-Monteith original.

A escassez de trabalhos comparando diretamente os métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith original tendem a dificultar uma melhor comparação sobre os resultados obtidos neste trabalho com os já obtidos pela literatura especializada, no entanto como verificado nos trabalhos de Silva et al. (2007) e Gomide et al. (2012) o método da Razão de Bowen tem gerado valores de evapotranspiração sempre superiores aos calculados pelo método Penman-Monteith FAO por exemplo, o que certamente acarretará em valores de  $K_c$  superestimados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 1) A evapotranspiração estimada pela razão de Bowen apresenta resultados medianos e maiores do que os valores estimados pelo método de Penman-Monteith original.
- 2) O coeficiente de cultura estimado considerando o método Penman-Monteith original resulta em valores mais próximos aos da literatura especializada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Retrato da irrigação no Brasil. Disponível em: < <http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?List=ccb75a86-bd5a-4853-8c76-cc46b7dc89a1&ID=12204> >. Acesso em: 30 de jun. 2016.

ALLEN, R. G. REF-ET: Reference Evapotranspiration Calculator, Version Windows 3.1.15. **University of Idaho Research and Extension Center**, Kimberly, ID, p. 99, 2013.

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome: FAO. 1998. p. 300.

ANDRADE, R. D. S. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 111-116, 2011.

BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável da Agricultura. Viçosa. **Departamento de Engenharia Agrícola: MMA/SRH/ABEAS**, 1997. p. 79-88.

BOWEN, S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, Ithaca, v. 27, p. 779-787, 1926.

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

CARVALHO, L. G. D. et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CUNHA, P. C. R. D. et al. Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 735-742, Abril 2013.

EUSER, T. et al. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2021-2032, 2014.

GOMIDE, R. L. Monitoramento para manejo de irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M. A., et al. **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA: SBEA, 1998. p. 133-238.

GOMIDE, R. L.; KOBAYASHI, K.; BORATOTTO, I. M. D. P. Monitoramento automático da necessidade hídrica das culturas do feijoeiro e milho por meio do balanço de energia/razão de Bowen. **Irriga**, p. 453-466, 2012.

IDE, A. K. **Cálculo da evapotranspiração de referência e da necessidade de irrigação ao longo do projeto de integração do Rio São Francisco**. Brasília: [s.n.], 2016.

IRMAK, S. et al. Modeling soybean canopy resistance from micrometeorological and plant variables for estimating evapotranspiration using one-step Penman-Monteith approach. **Journal of Hydrology**, p. 1-18, 2013.

LOPES, P. M. O. **Evapotranspiração da mangueira na região do Sul-médio São Francisco**. Campina Grande: DCA/CCT/UFPB. 1999. p. 108p.

MENDES, R. D. S. **Determinação da evapotranspiração por métodos diretos e indiretos e dos coeficientes de cultura da soja no Distrito Federal**. Brasília: UnB. 2006.

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/soja>>. Acesso em: 04 de jul. 2016.

MUNIZ, R. A. et al. Balanço de energia e evapotranspiração do capim Mombaça sob sistema de pastejo rotacionado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 1, p. 47-54, 2014.

OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **American Meteorological Society**. Zurique, p. 595-598, 1982.

OLIVEIRA, A. D. D. et al. Exigência térmica e índice de área foliar para a cultura da soja em Planaltina-DF. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, p. 1-5, 2011.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, n. 1-2, p. 131-143, 1996.

PAYERO, J. O. et al. Guidelines for validating Bowen ratio data. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 4, p. 1051-1060, 2003.

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

PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999.

RANA, G.; KATERJI, N.; PERNIOLA, M. evapotranspiration of sweet sorghum: A general model and multilocal validity in semiarid environmental conditions. **Water Resources Research**, p. 3237-3246, 2001.

SILVA, L. D. B. D.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método da razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.

SILVA, T. G. F. et al. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 139-147, 2011.

SILVA, T. J. A. et al. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 392-403, Mai-Ago 2007.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 3, p. 335-348, July 2000.

UNLAND, H. E. et al. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119-153, 1996.

## 7. ANEXOS

ANEXO A – Valores diários de  $ET_0$ ,  $ET_c$  estimado por Penman-Monteith original e  $ET_c$  estimado pela Razão de Bowen.

<b>DATA</b>	<b>Média <math>ET_0</math></b>	<b><math>ET_c</math> Penman-Monteith Original</b>	<b><math>ET_c</math> Razão de Bowen</b>
05/11/2015	3,0	0,2	1,7
06/11/2015	6,6	1,0	2,8
07/11/2015	6,0	1,1	2,4
08/11/2015	5,6	0,5	2,5
09/11/2015	7,5	1,6	5,4
10/11/2015	7,7	1,7	5,0
11/11/2015	7,3	2,6	4,9
12/11/2015	6,4	2,5	4,9
13/11/2015	6,3	1,8	4,3
14/11/2015	6,0	1,3	4,3
15/11/2015	2,6	0,9	2,9
16/11/2015	3,2	1,1	3,0
17/11/2015	3,0	1,6	3,7
18/11/2015	3,3	1,5	3,1
19/11/2015	3,4	2,0	4,3
20/11/2015	3,6	1,8	4,7
21/11/2015	4,2	2,4	4,0
22/11/2015	4,3	2,6	4,9
23/11/2015	3,4	2,3	4,7
24/11/2015	4,9	2,3	4,7
25/11/2015	5,4	4,3	6,3
26/11/2015	5,2	4,8	6,7
27/11/2015	2,7	1,8	3,4
28/11/2015	2,2	2,6	3,9
29/11/2015	4,3	3,7	5,7
30/11/2015	5,2	4,3	5,7
01/12/2015	5,2	3,9	5,7
02/12/2015	5,6	4,6	5,7
03/12/2015	5,3	3,8	4,1
04/12/2015	5,6	3,9	4,1
05/12/2015	5,0	3,7	4,7
06/12/2015	4,0	4,3	6,9
07/12/2015	4,6	3,9	5,4
08/12/2015	4,8	5,0	4,5

09/12/2015	5,2	4,2	5,5
10/12/2015	5,3	6,2	7,8
11/12/2015	5,8	5,6	7,9
12/12/2015	7,0	6,1	8,5
13/12/2015	4,2	4,8	6,9
14/12/2015	4,7	5,5	7,2
15/12/2015	6,0	6,1	8,5
16/12/2015	6,1	6,0	8,1
17/12/2015	5,9	6,0	8,4
18/12/2015	5,4	5,7	7,7
19/12/2015	5,6	4,0	6,0
20/12/2015	4,9	4,9	6,8
21/12/2015	4,8	5,6	7,5
22/12/2015	5,9	5,1	7,8
23/12/2015	7,0	5,8	9,1
24/12/2015	8,4	6,4	9,7
25/12/2015	7,2	6,6	9,1
26/12/2015	4,3	3,4	5,0
27/12/2015	3,9	4,1	5,5
28/12/2015	5,0	3,8	6,3
29/12/2015	2,7	2,4	3,8
30/12/2015	2,4	2,7	3,3
31/12/2015	4,6	6,5	8,0
01/01/2016	6,0	6,2	7,9
02/01/2016	5,2	5,4	6,7
03/01/2016	2,4	2,7	4,2
04/01/2016	3,1	3,7	3,9
05/01/2016	2,3	3,7	4,5
06/01/2016	2,7	2,5	2,7
07/01/2016	3,7	3,8	4,9
08/01/2016	2,1	3,0	3,9
09/01/2016	3,1	2,8	3,5
10/01/2016	4,6	5,3	7,3
11/01/2016	2,9	5,8	7,1
12/01/2016	2,4	2,0	2,5
13/01/2016	2,1	2,7	3,9
14/01/2016	2,0	1,5	2,2
15/01/2016	1,8	2,2	3,9
16/01/2016	2,5	2,6	4,5
17/01/2016	0,9	1,1	0,9
18/01/2016	2,0	1,8	2,5

19/01/2016	2,2	1,8	3,3
20/01/2016	2,8	2,1	3,5
21/01/2016	3,1	3,8	4,9
22/01/2016	3,6	5,1	5,8
23/01/2016	2,6	2,3	2,9
24/01/2016	4,0	4,9	5,6
25/01/2016	3,9	3,3	4,3
26/01/2016	4,6	6,3	6,7
27/01/2016	3,3	2,5	3,5
28/01/2016	2,4	2,0	2,2
29/01/2016	3,9	3,6	4,9
30/01/2016	6,0	4,3	6,3
31/01/2016	6,1	5,7	7,2
01/02/2016	6,2	5,1	6,3
02/02/2016	5,4	4,4	5,5
03/02/2016	5,8	4,6	5,4
04/02/2016	5,0	5,3	5,5
05/02/2016	4,1	3,1	3,8
06/02/2016	4,8	5,3	4,5
07/02/2016	5,7	5,3	4,3
08/02/2016	5,2	2,5	2,6
09/02/2016	4,4	2,0	2,6
10/02/2016	5,4	4,7	4,0
11/02/2016	4,8	2,0	3,0
<b>TOTAL</b>	<b>443,1</b>	<b>354,2</b>	<b>500,7</b>