



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

USO DA RAZÃO DE BOWEN PARA O CÁLCULO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO FEIJOEIRO
(Phaseolus vulgaris L.)

ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

Brasília - DF
Dezembro de 2015

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

USO DA RAZÃO DE BOWEN PARA O CÁLCULO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO FEIJOEIRO
(Phaseolus vulgaris L.)

ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

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
Dezembro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

De Paula, Adriano Cesar Pereira

Uso da razão de Bowen para o cálculo da evapotranspiração da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). / Adriano Cesar Pereira de Paula; orientador Cícero Lopes da Silva. - Brasília, 2015. 38 f.

Monografia de Graduação (G) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2015.

1. Evapotranspiração real.
 2. Fluxo de calor latente.
 3. Balanço hídrico.
 4. Razão de Bowen.
- I. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

De Paula, A. C. P. **Uso da razão de Bowen para o cálculo da evapotranspiração da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Trabalho de conclusão de curso. Agronomia. Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Brasília, 2015. 38 f.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Adriano Cesar Pereira de Paula

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO: Uso da razão de Bowen para o cálculo da evapotranspiração da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.).

GRAU: Bacharel ANO: 2015

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.

ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

cesar.adriano087@gmail.com

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

USO DA RAZÃO DE BOWEN PARA O CÁLCULO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO FEJJOEIRO
(Phaseolus vulgaris L.)

ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

10/0090079

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, 01 DE DEZEMBRO DE 2015 POR:

Dr. CÍCERO LOPES DA SILVA (ORIENTADOR)

Professor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB

Dra. SELMA REGINA MAGGIOTTO (EXAMINADOR INTERNO)

Professora da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UnB

ANDRE KEITI IDE (EXAMINADOR EXTERNO)

Engenheiro Agrônomo Analista de Infraestrutura do Ministério da Integração

Dedico este trabalho a toda
minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui.

Aos meus pais Adão Bispo e Maria Aparecida, por não medirem esforços para garantir que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Aos meus irmãos Leandro Henrique, Janaína Thaís, Jaciara Aparecida e Leonardo Lucas, que de alguma maneira contribuíram para essa conquista.

Ao colega de graduação, grande amigo e também meu compadre Adailton Guimarães, pela amizade verdadeira e imprescindível, além dos sábios conselhos e imensa contribuição à minha formação.

Ao também colega de graduação Alyson Silva, pelos anos de convívio e amizade.

Ao amigo de longa data Antônio Souza, que jamais deixou de acreditar em minha capacidade e sempre foi um de meus maiores incentivadores.

A uma pessoa muito especial em minha vida, Angélica Brandão, por todo amor, carinho, apoio, confiança e paciência em todos os momentos.

À Agência Nacional de Águas, pela oportunidade de estágio.

Ao Especialista em Recursos Hídricos da ANA, Cesar Pimentel, pelos ensinamentos e conselhos passados durante o estágio.

Ao Especialista em Geoprocessamento da ANA, Morris Scherer-Warren, pelos ensinamentos, apoio e confiança durante a orientação no trabalho de campo e análise dos dados.

À Professora Dra. Selma Maggiotto e ao Engenheiro Agrônomo Andre Ide, pela participação na banca examinadora.

Ao Professor Dr. Cícero Lopes da Silva, pela orientação acadêmica, paciência e ensinamentos.

Aos demais colegas e professores da graduação...

“Nós somos da Agronomia...”

SUMÁRIO

RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
2.1 Local de instalação das estações do sistema automático Razão de Bowen	5
2.2 Equações usadas para o cálculo da evapotranspiração	8
2.3 Balanço de água no solo	11
2.4 Determinação da curva Kc.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1 Correlação dos valores de LE entre estações	14
3.2 Avaliação da adequabilidade da irrigação	16
3.3 Acompanhamento da quantidade de água no solo.....	18
3.4 Curvas Kc	19
4. CONCLUSÕES	23
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Disposição das estações automáticas do sistema razão de Bowen no interior do pivô central localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. Fonte: Google Earth. 5
- Figura 2.** Estação meteorológica do sistema razão de Bowen e seus respectivos sensores no interior do pivô, uma semana após o plantio da cultura do feijão, em Maio de 2015 (A). Disposição dos sensores TDR entre plantas na linha de plantio (B). 6
- Figura 3.** Posicionamento das estações do sistema razão de Bowen no interior do pivô localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, em Maio de 2015. . 7
- Figura 4.** Estação automática do sistema razão de Bowen no interior de um pivô central localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, ao final do primeiro mês do ciclo da cultura do feijão, em Maio de 2015..... 7
- Figura 5.** Fases de desenvolvimento da cultura do feijoeiro em pivô central na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto. Fase de desenvolvimento da cultura aos 8, 28, 70 e 97 dias após o plantio respectivamente em A, B, C e D. 8
- Figura 6.** Correlação dos valores de LE entre as estações automáticas 1 e 2 do sistema razão de Bowen, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. 14
- Figura 7.** Correlação dos valores de LE entre as estações automáticas 2 e 3 do sistema razão de Bowen, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. 15
- Figura 8.** Correlação dos valores de LE entre as estações automáticas 1 e 3 do sistema razão de Bowen, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. 15
- Figura 9.** Comportamento semanal dos valores totais da evapotranspiração real da cultura (ETrc) do feijoeiro calculada pelo método da razão de Bowen e entradas de água via

chuva e irrigação, em um pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. 17

Figura 10. Comportamento da quantidade de água no solo durante o ciclo da cultura do feijoeiro determinada pelo método do balanço hídrico e por sensores TDR, no interior de um pivô localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015..... 19

Figura 11. Evapotranspiração real da cultura (ET_{rc}) do feijoeiro calculada pela razão de Bowen e evapotranspiração de referência (ET_o) calculada pelo software REF-ET, a partir dos dados fornecidos por estações meteorológicas instaladas no interior do pivô localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. 20

Figura 12. Valores diários do coeficiente de cultivo (K_c) determinados durante o ciclo da cultura do feijoeiro em um pivô central, localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. 21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Evapotranspiração real da cultura (ET _{rc}) do feijoeiro calculada pela razão de Bowen e entrada de água via chuva e irrigação mensal e total (mm) durante o ciclo da cultura, em um pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal.	17
--	----

USO DA RAZÃO DE BOWEN PARA O CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)

Autor: ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

Orientador: CÍCERO LOPES DA SILVA

RESUMO

A irrigação é cada vez mais imprescindível para o máximo rendimento dos cultivos e a busca por sua adequação e eficiência é fundamental para o uso racional dos recursos hídricos. Dessa forma, este trabalho teve como principal objetivo a avaliação da adequabilidade da irrigação da cultura do feijoeiro em um pivô central na região do PAD-DF, Distrito Federal, em função da sua demanda evapotranspirométrica calculada pelo método da Razão de Bowen. A determinação da curva Kc e a avaliação da quantidade de água no solo durante o ciclo da cultura, determinada pelo balanço hídrico e por TDR, também foram realizadas. Os dados climáticos necessários para a determinação da evapotranspiração real, coeficiente Kc e conteúdo de água no solo foram fornecidos por três estações automáticas instaladas no interior da área irrigada. A avaliação da adequação da irrigação foi realizada comparando-se as entradas de água com a demanda evapotranspirométrica da cultura. A determinação da evapotranspiração de referência necessária para o cálculo do coeficiente Kc foi realizada pela equação Penman-Monteith FAO, por meio do software REF-ET. As entradas de água durante o ciclo da cultura foram menores que o total demandado de acordo com a evapotranspiração estimada, indicando irrigação deficiente. A quantidade de água no solo calculada em conformidade com o balanço hídrico diferiu dos fornecidos pelo TDR, e os valores de Kc encontrados estão de acordo com a literatura pertinente.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., fluxo de calor latente, evapotranspiração real, balanço hídrico.

USE OF BOWEN RATIO TO CALCULATE THE BEAN CROP EVAPOTRANSPIRATION

Author: ADRIANO CESAR PEREIRA DE PAULA

Adviser: CÍCERO LOPES DA SILVA

ABSTRACT

The importance of irrigation is increasing for maximizing crop yield and the development of irrigation suitability and efficiency is crucial to rational use of water resources. Thus, this study aimed to assess the suitability of an irrigated bean plot located under a center pivot in the PAD-DF region, Distrito Federal, according to its evapotranspiration demand calculated by the Bowen ratio method. The determination of Kc curve and evaluation of the amount of water in the soil during the crop cycle was also performed using water balance and TDR. The climatic data necessary for determining of the actual evapotranspiration, Kc coefficient and water content in the soil were provided by three automatic agrometeorological stations installed inside the irrigated area. The assessment of irrigation was performed by comparing the water inflows to the evapotranspiration demand of the culture. The determination of the reference evapotranspiration necessary to calculate the coefficients Kc was performed by Penman-Monteith FAO equation, using the REF-ET software. Water inflows during the crop cycle were lower than the total required according to estimated actual evapotranspiration, indicating poor irrigation. The amount of water in the soil calculated with the water balance differ from those provided by TDR, and the Kc values found are consistent with the literature.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., latent heat flux, actual evapotranspiration, water balance.

1. INTRODUÇÃO

A cultura do Feijão, *Phaseolus vulgaris* L., tem grande importância econômica para o Brasil em razão de ser um dos principais alimentos na dieta dos brasileiros. O grão é fonte de proteína vegetal, vitaminas do complexo B, sais minerais, ferro, cálcio e fósforo. Por ser uma cultura bastante exigente em água e muito sensível ao déficit e excesso hídrico, exige um manejo adequado da irrigação.

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 boa qualidade. 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).

São duas as estratégias básicas para o manejo da irrigação: (a) suprir totalmente a necessidade de água da cultura, aplicando uma lâmina média capaz de atender o déficit hídrico e proporcionar a máxima produtividade (DOORENBOS & PRUITT, 1984). (b) suprir parcialmente a necessidade hídrica da cultura, cujo objetivo é aplicar uma lâmina média inferior àquela para máxima produtividade, visando maximizar a produção por unidade de volume de água, aumentando assim a eficiência de aplicação (PHENE, 1989). Esta segunda estratégia pressupõe que a disponibilidade de água constitui a limitação da produção agrícola, enquanto a primeira pressupõe que o fator limitante é a disponibilidade de área agricultável.

Levando em consideração que o fator limitante é a área agricultável, Figueiredo et al. (2007) verificaram que enquanto se aumenta a lâmina de água durante o ciclo do feijão, aumenta também a receita líquida esperada e o risco associado, até o ponto em que tanto a receita quanto o risco atingem um valor máximo e, a partir daí, começam a cair. De acordo com Nascimento et al. (2001), a demanda total de água do feijoeiro determinada por tensiometria no estado de Goiás em sistema de plantio convencional foi de 325 mm, enquanto que para plantio direto a demanda foi de 260 mm, representando uma redução de 20% do total de água aplicado em razão do aumento na sua retenção no solo e redução de evaporação favorecidos pelo plantio direto.

Os efeitos da deficiência hídrica na cultura do feijão se iniciam quando a taxa da evapotranspiração supera a taxa de absorção de água pelas raízes e sua transmissão para

as partes aéreas da planta (SILVEIRA & STONE, 2001). Nos estudos dos efeitos do déficit hídrico na cultura do feijão, Calvache et al. (1997) verificaram que o estresse hídrico durante a floração e formação de vagens reduziu em 30% a produtividade do feijoeiro, enquanto no enchimento de vagens a redução foi de 36%.

O excesso hídrico também prejudica o bom rendimento da cultura, sendo que além do favorecimento de doenças, também aumenta a resistência ao movimento da água através das raízes, diminui a absorção de nutrientes, aumenta a concentração de substâncias tóxicas na planta e diminui o crescimento e o potencial de água na folha (MONTEIRO, 2009). Assim sendo, a busca por uma irrigação mais adequada e eficiente é fundamental para a racionalidade dos cultivos e dos recursos hídricos, uma vez que o setor agrícola é responsável pela maior parte da demanda de água.

O conhecimento das taxas de evapotranspiração é fundamental para um adequado manejo da irrigação. Dentre os métodos disponíveis para tal finalidade, o tanque Classe A é um dos mais acessíveis aos irrigantes. Além de ser de fácil execução, 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 ao local do cultivo (CUNHA et al., 2013).

Os lisímetros também são bastante úteis na determinação da evapotranspiração, podendo ser o método mais preciso dependendo do tipo 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, 2003).

Existem também várias equações baseadas em dados meteorológicos para cálculo da evapotranspiração, e uma das mais conhecidas é a de Penman-Monteith FAO, que é uma evolução do método de Penman. Além de levar em consideração aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, a equação de Penman-Monteith FAO 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. É recomendada pela FAO como método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN et al., 1998).

Além dos parâmetros aerodinâmicos e termodinâmicos, a equação Penman-Monteith FAO leva em conta o saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G), temperatura média do ar (T), velocidade do vento tomada a dois metros de altura (U_2), pressão de vapor de saturação (e_s), pressão real de vapor (e_a), declividade da curva de pressão de vapor (Δ) e o coeficiente psicométrico (γ). Devido à dependência de dados meteorológicos e da difícil aquisição destes por parte dos agricultores, muitas vezes são usados métodos mais simples para a determinação da ETo (CARVALHO et al., 2011).

Outro importante método 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 psicométrico pelo gradiente de temperatura do ar (ΔT) com relação à pressão de vapor (Δe) 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).

Nesse contexto, o método de Bowen tem sido usado por diversos autores para a determinação do balanço de energia e evapotranspiração. Silva et al. (2007) determinaram o balanço de energia e a evapotranspiração para culturas irrigadas de maracujazeiro em dois sistemas de plantio (linhas de cultivo norte-sul e leste-oeste) em Piracicaba, SP e concluíram que o saldo de radiação sobre o cultivo de maracujazeiros não foi influenciado pela orientação de plantio, e o componente de maior contribuição ao balanço de energia foi o calor latente de evaporação, utilizando cerca de 100% da energia disponível.

Silva et al. (2005) estimando a evapotranspiração do capim Tanzânia pelo método da razão de Bowen e do lisímetro de pesagem, constataram que apesar da evapotranspiração obtida por Bowen ser influenciada pela ausência de diferenças de

temperatura e umidade em períodos chuvosos, esses valores apresentaram desempenhos satisfatórios.

Analisando as variações nas magnitudes e nas partições dos componentes do balanço de energia pelo método da razão de Bowen para cana-de-açúcar irrigada em Juazeiro, BA, Silva et al. (2011) verificaram que 81% da energia disponível foi destinada ao fluxo de calor latente. Lima et al. (2011) determinaram os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração da cultura do feijão-caupi cultivado sob condições de sequeiro em Areia, PB. Os autores verificaram que a evapotranspiração média diária foi de 3,8 mm e que 65% da energia disponível foi utilizada como fluxo de calor latente, 23% como fluxo de calor sensível e 12% como fluxo de calor no solo.

Muniz et al. (2014) quantificaram o balanço de energia pelo método da razão de Bowen e a evapotranspiração do capim Mombaça irrigado sob sistema de pastejo rotacionado em Campos dos Goytacazes, RJ. Os fluxos de calor latente, sensível e no solo representaram respectivamente 66, 23 e 12% da energia disponível durante o período, sendo a evapotranspiração média diária de 3,87 mm. Teixeira (2001) avaliou os componentes do balanço de energia pela razão de Bowen no primeiro ano da cultura da banana em Petrolina, PE e verificou que 87% do saldo de radiação foi usado como fluxo de calor latente, 11% como fluxo de calor no solo e 2% como fluxo de calor sensível.

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, 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 (β), pois 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 ocorra fluxo horizontal de massa e calor.

Os objetivos deste trabalho foram analisar a adequação da irrigação por pivô central na cultura do feijoeiro por meio do cálculo da evapotranspiração real pelo método da Razão de Bowen, acompanhar a quantidade de água no solo durante o ciclo da cultura e determinar o seu coeficiente de cultivo (K_c).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de instalação das estações do sistema automático Razão de Bowen

O experimento foi realizado na bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, localizada na região do Programa de Assentamento Dirigido do DF (PAD-DF) em uma cultura de feijão cultivar “Pérola” sob um pivô central. A área irrigada pelo pivô é de 90,6 hectares e o centro de sua posição geográfica é $15^{\circ}54'31,05''$ S e $47^{\circ}25'12,94$ W, com altitude média de 940 m. O plantio foi realizado no dia 30/04/2015 e a instalação das estações meteorológicas uma semana depois, permanecendo até 05/08/2015 e totalizando um período de 90 dias.

Foram instaladas três estações automáticas do sistema Razão de Bowen posicionadas em linha no interior do pivô (Figura 1), as quais forneceram todos os dados necessários ao cálculo da evapotranspiração real da cultura, da quantidade de chuva e irrigação, da curva de Kc e do conteúdo de água no solo.

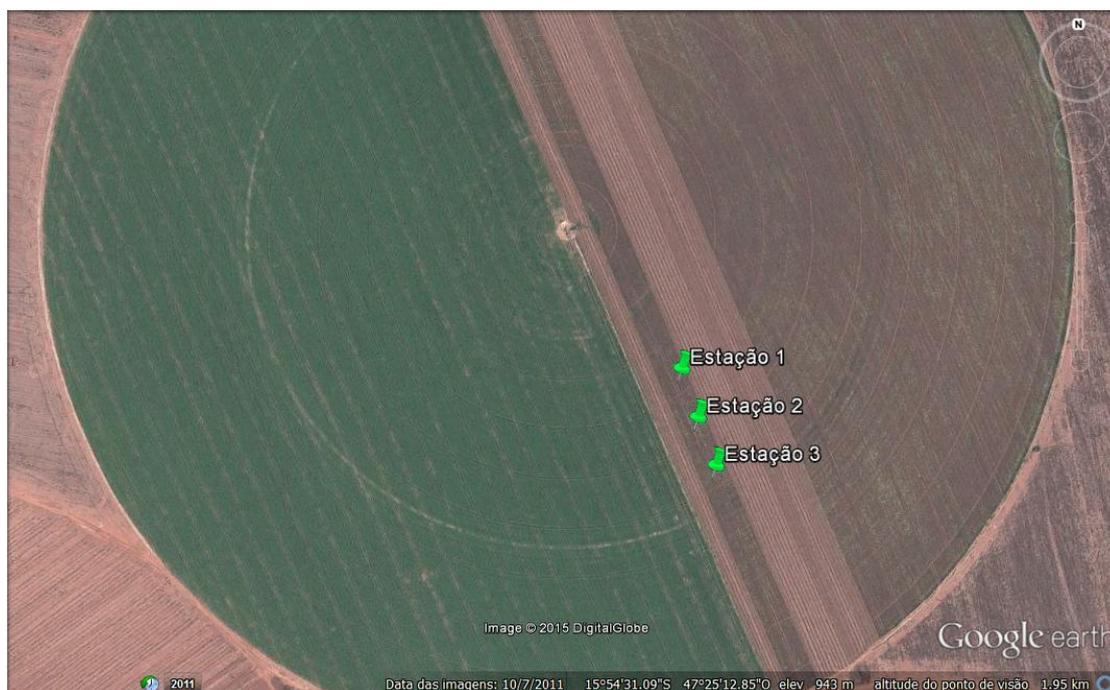


Figura 1. Disposição das estações automáticas do sistema razão de Bowen no interior do pivô central localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015. Fonte: Google Earth.

As estações foram equipadas com os sensores de umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, conteúdo volumétrico de água no solo e pluviômetros (Figura 2A). Os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram instalados a uma altura de 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 uma altura de 1,80 m e as placas de fluxo de calor no solo foram enterradas a 2 cm de profundidade.

Para o acompanhamento da quantidade de água no solo foram instalados, em cada estação, seis sensores TDR com comprimento das hastes de 30 cm, em posição vertical entre as plantas na linha de plantio (Figura 2B). Todas as estações eram compostas com os mesmos conjuntos de sensores, exceto uma em que não havia o pluviômetro instalado. A instalação dos pluviômetros objetivou tanto a coleta de água da irrigação quanto de eventuais precipitações, doravante denominadas entradas de água.

Todos os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (CR3000 Measurement and Control System, Campbell Scientific) e programado para o armazenamento dos dados médios no intervalo de 10 minutos.



Figura 2. Estação meteorológica do sistema razão de Bowen e seus respectivos sensores no interior do pivô, uma semana após o plantio da cultura do feijão, em Maio de 2015 (A). Disposição dos sensores TDR entre plantas na linha de plantio (B).



Figura 3. Posicionamento das estações do sistema razão de Bowen no interior do pivô localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, em Maio de 2015.

Durante o período da coleta dos dados foram realizadas visitas frequentes para a verificação da situação dos equipamentos, incluindo limpezas e nivelamento dos sensores do saldo de radiação, bem como o acompanhamento do desenvolvimento da cultura.



Figura 4. Estação automática do sistema razão de Bowen no interior de um pivô central localizado na Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, ao final do primeiro mês do ciclo da cultura do feijão, em Maio de 2015.

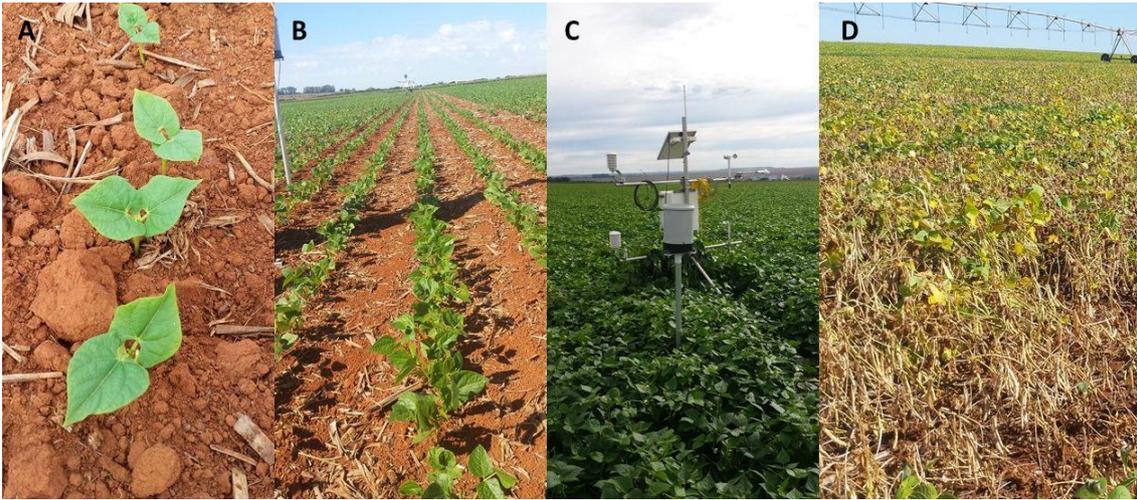


Figura 5. Fases de desenvolvimento da cultura do feijoeiro em pivô central na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto. Fase de desenvolvimento da cultura aos 8, 28, 70 e 97 dias após o plantio respectivamente em A, B, C e D.

2.2 Equações usadas para o cálculo da evapotranspiração

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 (β), foram usadas as diferenças de temperatura (ΔT) e de pressão real de vapor do ar (Δe) entre os níveis 1 e 2 conforme descrito anteriormente. As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas equações 1 e 2.

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

$$e_a = e_s \times \frac{UR}{100} \quad (2)$$

Em que:

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

T – Temperatura do ar nos níveis de medição ($^{\circ}\text{C}$);

UR – Umidade relativa do ar (%);

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

Para o cálculo do valor de β foi utilizada a equação 3, sendo γ o coeficiente psicométrico considerado igual a $0,0626 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

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

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 nas medições das diferenças entre os níveis (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 β , causando conseqüentemente fluxos de calor sensível e latente incorretos ou incoerentes.

Para a exclusão dos valores inconsistentes de β foram utilizados dois 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 β seja aceito. A segunda condição para aceitação dos valores de β foi realizada de acordo com Ortega-Farias et al. (1996) e Unland et al. (1996), em que aqueles dentro do intervalo $-1,3 < \beta < -0,7$ são descartados. Assim, além da filtragem, elimina-se aqueles próximos e iguais a -1, os quais inviabilizariam o uso da equação 5.

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

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

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

Em que:

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

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

ΔT – Diferença de temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 ($^{\circ}\text{C}$);

R_n – Saldo de Radiação (W m^{-2});

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

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

Considerando que os eventos de irrigação poderiam favorecer o aparecimento de dados inconsistentes de LE , os valores próximos aos eventos, isto é, antes ou depois, foram descartados. Com os dados de LE e o calor latente de vaporização da água (λ) calculado pela equação 6, foi possível a determinação da evapotranspiração real da cultura por meio da equação 7.

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

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

Em que:

T – Temperatura do ar no nível 1 ($^{\circ}\text{C}$);

ET_{rc} – Evapotranspiração real da cultura do feijoeiro 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 ET_{rc} da cultura para os períodos de 10 minutos, a evapotranspiração foi acumulada diariamente, agrupando os respectivos intervalos de tempo durante todo o ciclo e sem qualquer tipo de interpolação dos dados filtrados.

Considerando que não houve qualquer manejo da irrigação no pivô em questão, a sua avaliação em adequada, excessiva ou deficiente foi realizada por meio da comparação

dos valores de evapotranspiração do feijoeiro com as entradas de água em períodos semanais, mensais e de todo o ciclo da cultura. O período total foi de 13 semanas, sendo feita a soma tanto da ET_{rc} calculada pela razão de Bowen quanto das entradas de água fornecidas pelo pluviômetro. A primeira semana compreendeu o período de 08/05/2015 a 14/05/2015, e assim sucessivamente em períodos de 7 dias até a última semana, de 31/07/2015 a 05/08/2015. Do mesmo modo foram realizadas avaliações mensais, constituídas pelos meses de Maio, Junho, Julho e Agosto.

2.3 Balanço de água no solo

Os cálculos do balanço de água no solo foram realizados com o objetivo de acompanhar a variação da quantidade de água ao longo do período estudado por meio das leituras do TDR e da equação de simulação de umidade no solo, que considera as entradas e saídas de água. A determinação da água no solo foi feita diariamente, sendo realizada de acordo com a média das leituras do TDR das três estações. Considerando uma profundidade de solo igual a 300 mm, a quantidade de água foi então determinada pela equação 8.

$$LA = (L_{TDR}) \times H \quad (8)$$

Em que:

LA – Lâmina de água no solo (mm);

L_{TDR} – Leitura da umidade do solo informada pelo TDR ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

H – Profundidade do solo em mm.

A simulação da umidade no solo foi realizada a partir da quantidade de água do primeiro dia de acordo com a equação 8, enquanto os valores subsequentes foram determinados por meio da equação de balanço hídrico (Equação 9).

$$LA_i = LA_{i-1} + (P + I)_i - ET_{rc_i} \quad (9)$$

Em que:

LA_i – Lâmina de água no solo no final do dia i (mm);

LA_{i-1} – Lâmina de água no solo no dia anterior a i (mm);

$(P+I)_i$ – Entrada de água no solo no dia i (mm);

ET_{rc_i} – Evapotranspiração real da cultura calculada pela razão de Bowen no dia i (mm).

A equação 9 foi usada levando em consideração que não ocorreu escoamento superficial e nem percolação, em função da pequena declividade da área. Além disso, sendo as irrigações de pequenas lâminas e a baixa quantidade de chuva observada, é de se esperar que essas atendam apenas ao uso consumptivo da planta, ou seja, sua demanda hídrica.

2.4 Determinação da curva Kc

De acordo com Allen et al. (1998), para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) por meio da equação de Penman-Monteith FAO é preciso que algumas condições sejam atendidas. A superfície deve ser coberta por grama em crescimento ativo, sem restrição hídrica e com altura média de 12 cm, além da resistência superficial assumida ser de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23.

Devido à instalação das três estações no interior da área irrigada e tendo em vista a inexistência de outra estação próxima, o cálculo da evapotranspiração de referência ficou limitado ao uso dos próprios dados verificados nas mencionadas estações. Ao assumir que a umidade relativa, a temperatura do ar, a velocidade do vento e o saldo de radiação não teriam modificações significativas em virtude de cobertura vegetal diferente da grama, poderia ocorrer alguma inconsistência nesses dados, principalmente na resistência aerodinâmica do ar (r_a). Além disso, o índice de área foliar em função do desenvolvimento da cultura do feijoeiro também influencia nos dados, já que possui comportamento completamente diferente à grama.

De acordo com Monteith (1965), a resistência aerodinâmica (r_a) para cobertura vegetal de porte elevado é menor quando comparada à cobertura de porte baixo, já que do ponto de vista aerodinâmico, uma cultura de altura mais elevada possui um parâmetro

de rugosidade maior, o que lhe confere melhor superfície de contato, facilitando a difusão turbulenta.

Entretanto, a importação dos dados de outras estações climatológicas distantes poderia implicar em maiores incertezas, pois além das diferenças climáticas devido à distância, há também a insegurança em relação ao manejo adequado dessas estações, de modo que não se pode afirmar que suas condições estão de acordo com as requeridas pela FAO.

Dessa maneira, o coeficiente de cultivo durante o ciclo do feijoeiro foi determinado pela relação dos valores médios diários de ET_{rc} calculados pela razão de Bowen e a ET_o diária determinada pela equação de Penman-Monteith FAO. O cálculo de ET_o foi realizado com o auxílio do software Reference Evapotranspiration Calculator - REF-ET, versão 3.1.15 desenvolvido por Allen (2013), usando valores médios horários de velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ar, fluxo de calor no solo e saldo de radiação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Correlação dos valores de LE entre estações

Após a determinação dos resultados de LE foi realizada a correlação desses entre estações. As Figuras 6, 7 e 8 representam respectivamente as correlações LE1 x LE2 (Estação 1 x Estação 2), LE2 x LE3 (Estação 2 x Estação 3) e LE1 x LE3 (Estação 1 x Estação 3). As correlações permitiram a observação da associação linear dos valores de LE entre duas estações e posteriormente a verificação se a declividade da reta se aproxima da unidade, expressando boa correlação.

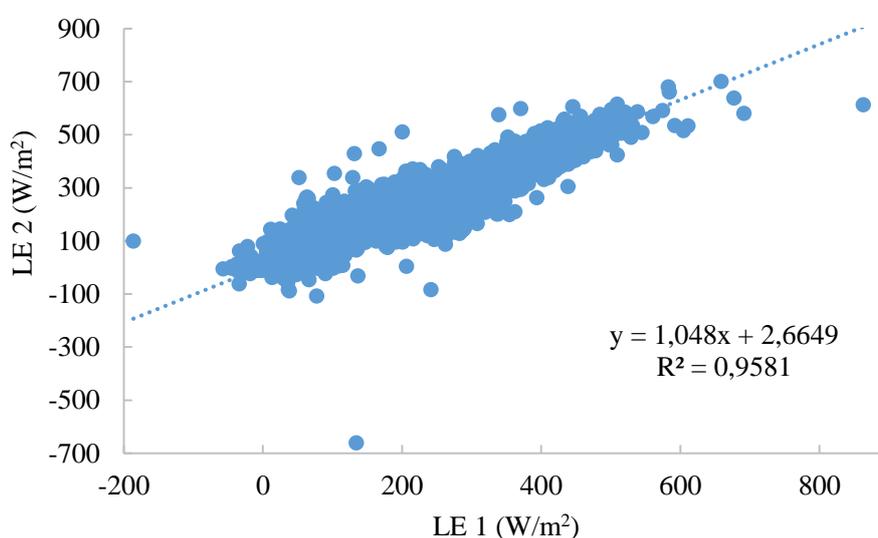


Figura 6. Correlação dos valores de LE entre as estações automáticas 1 e 2 do sistema razão de Bowen, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

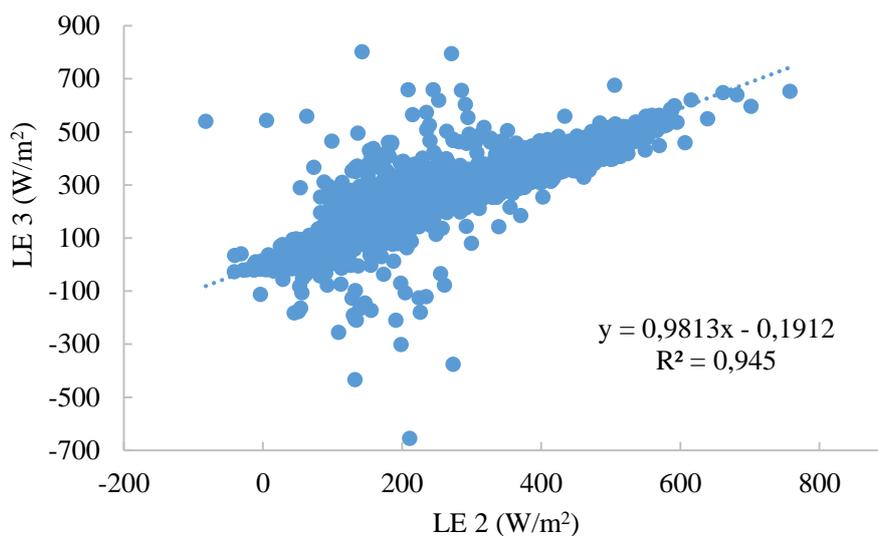


Figura 7. Correlação dos valores de LE entre as estações automáticas 2 e 3 do sistema razão de Bowen, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

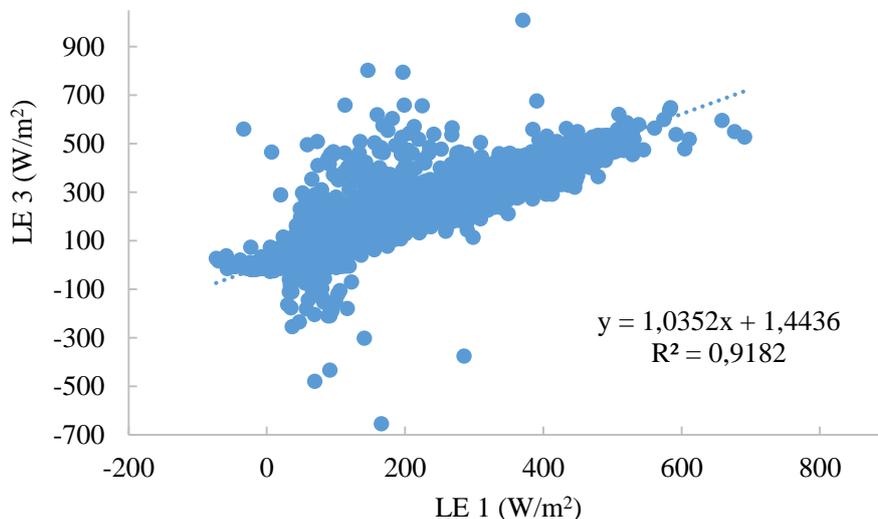


Figura 8. Correlação dos valores de LE entre as estações automáticas 1 e 3 do sistema razão de Bowen, instaladas no interior do pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

Pelo posicionamento linear das estações (Figuras 1 e 3) e devido ao movimento angular do pivô, é possível afirmar que as três 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 nas seguintes, 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.

Embora o posicionamento das estações possa ter influenciado na variação de alguns resultados de LE, os coeficientes angulares das retas ajustadas para as três correlações tiveram seus valores próximo à unidade. Os valores de 1,048; 0,9813 e 1,0352 indicam que as duas variáveis em cada correlação têm variações quase que da mesma magnitude. Verifica-se também elevados coeficientes de determinação (R^2), indicando excelente correlação entre os resultados de LE.

3.2 Avaliação da adequabilidade da irrigação

O período de avaliação da irrigação foi de 90 dias, resultando em um total da ET_{rc} de 313,3 mm enquanto o somatório das entradas de água foi de 269 mm, correspondendo a uma diferença de 44,3 mm entre o total evapotranspirado e o total de água aplicado. A evapotranspiração média diária da cultura foi de 3,5 mm, sendo o valor mais alto de 5,1 mm registrado no 84° dia após o plantio, dentro do período de enchimento de grãos. A lâmina média diária das entradas de água foi de 3 mm e a máxima entrada registrada foi de 17 mm no 26° dia após o plantio, na fase vegetativa do feijão.

A Figura 9 mostra a comparação entre os valores de evapotranspiração calculados pela razão de Bowen e as entradas de água para períodos semanais. No período total de 13 semanas, somente na primeira, na quarta e na sexta semana as entradas de água foram superiores à evapotranspiração, indicando que houve irrigação deficiente em maior parte do ciclo da cultura.

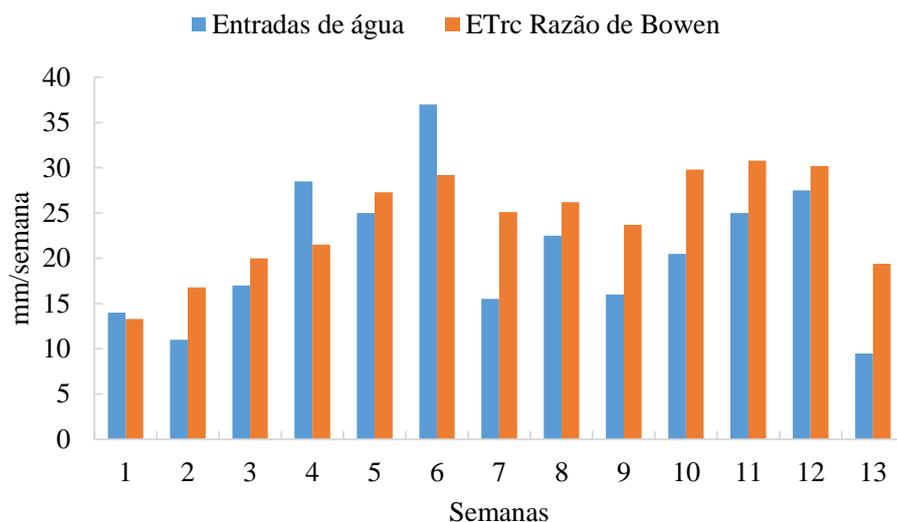


Figura 9. Comportamento semanal dos valores totais da evapotranspiração real da cultura (ETrc) do feijoeiro calculada pelo método da razão de Bowen e entradas de água via chuva e irrigação, em um pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

Em relação aos períodos mensais, a Tabela 1 ratifica a figura 9, indicando também um déficit de irrigação ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro.

Tabela 1. Evapotranspiração real da cultura (ETrc) do feijoeiro calculada pela razão de Bowen e entrada de água via chuva e irrigação mensal e total (mm) durante o ciclo da cultura, em um pivô central localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal.

Mês	Entradas de água (mm)	Evapotranspiração real da cultura (mm)
Maio	61	57,7
Junho	98,5	113,2
Julho	100	127
Agosto	9,5	15,4
TOTAL	269	313,3

Apesar da irrigação ter sido deficiente, a lâmina total de água aplicada está próxima à quantidade demandada para o feijoeiro no estado de Goiás segundo Nascimento et al. (2001), em que os autores apontam o valor de 260 mm para todo o ciclo da cultura.

3.3 Acompanhamento da quantidade de água no solo

O acompanhamento da quantidade de água no solo tanto pelo método do TDR quanto pelo balanço hídrico é ilustrado na Figura 10. O valor inicial para esses dois parâmetros foi de 84,1 mm e a quantidade final de água no solo fornecida pela simulação do balanço hídrico foi de 39,8 mm, enquanto o conteúdo final fornecido pelo TDR foi de 76,2 mm. Verifica-se também que a diferença entre a quantidade de água no solo no início e no fim do ciclo da cultura foi diferente nos dois métodos, correspondendo a 44,3 mm para o método do balanço hídrico e 8 mm para o TDR.

De acordo com a Tabela 1 a diferença entre as entradas de água e a evapotranspiração real da cultura calculada pela razão de Bowen foi de 44,3 mm, coincidindo com a diferença entre o total de água inicial e final de acordo com o balanço hídrico. Essa observação está intimamente ligada ao fato do balanço hídrico ter sido executado apenas com os valores de entrada de água no solo e a evapotranspiração real da cultura calculada pela razão de Bowen, sem a consideração de percolação profunda.

Por outro lado, considerando somente os resultados do conteúdo de umidade dados pelo TDR, seria possível afirmar que a evapotranspiração real do feijoeiro calculada pela razão de Bowen em todo o ciclo foi superestimada em 36,3 mm, pois a variação do conteúdo de água no solo entre o início e o fim do ciclo da cultura foi de 8 mm.

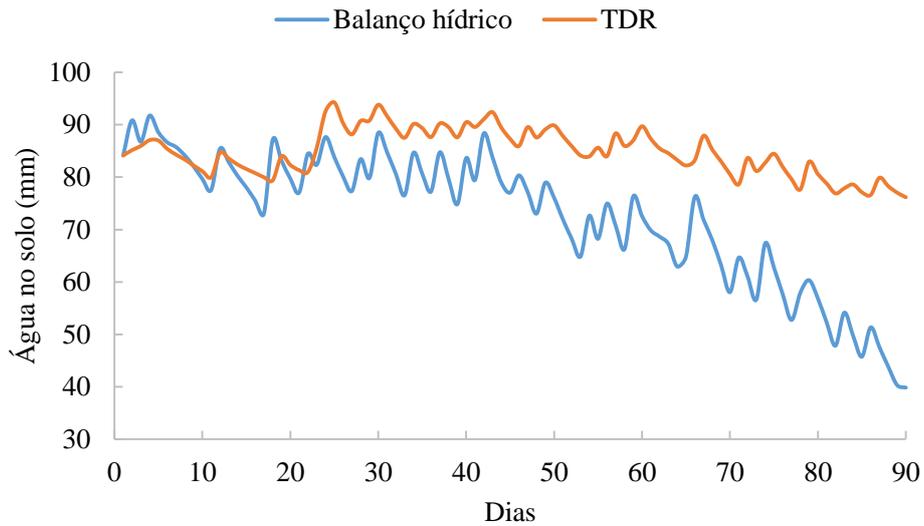


Figura 10. Comportamento da quantidade de água no solo durante o ciclo da cultura do feijoeiro determinada pelo método do balanço hídrico e por sensores TDR, no interior de um pivô localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

A discrepância mencionada anteriormente também permite afirmar que, se o balanço hídrico forneceu valores reais de conteúdo de água no solo, as irrigações foram deficientes.

3.4 Curvas Kc

Na Figura 11 é mostrado o comportamento da evapotranspiração real da cultura determinada pela razão de Bowen e a evapotranspiração de referência de acordo com o método de Penman-Monteith FAO. A evapotranspiração de referência média diária para o ciclo do feijoeiro foi de 3,7 mm, sendo a máxima ETo de 5,4 mm registrada no 91º dia após o plantio.

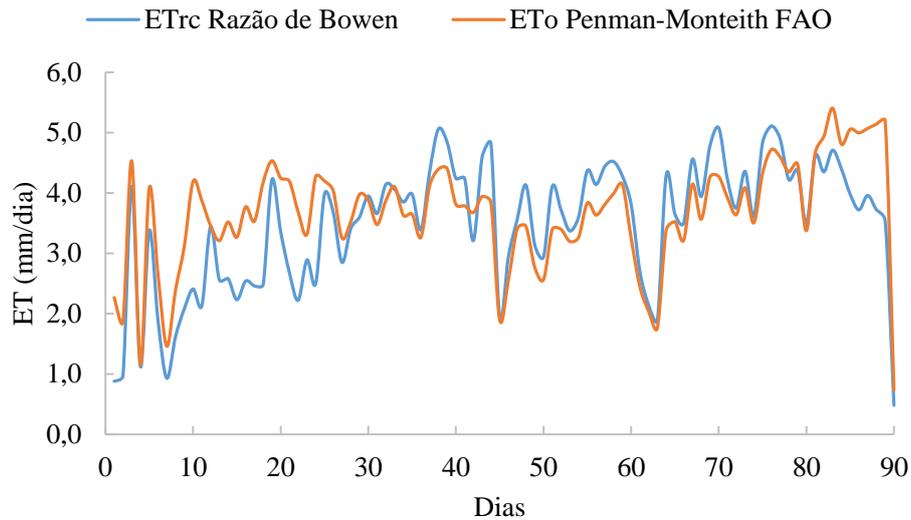


Figura 11. Evapotranspiração real da cultura (ETrc) do feijoeiro calculada pela razão de Bowen e evapotranspiração de referência (ETo) calculada pelo software REF-ET, a partir dos dados fornecidos por estações meteorológicas instaladas no interior do pivô localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

O comportamento observado é semelhante ao que Bastos et al. (2008) encontraram para o feijão-caupi, em que a evapotranspiração da cultura (ETrc) foi menor (25% em média no presente trabalho) que a evapotranspiração de referência (ETo) nos primeiros 30 dias, invertendo-se a partir de então esse comportamento até atingir os 80 dias aproximadamente, correspondendo às fases de florescimento e enchimento de grãos.

Os valores diários de Kc ao longo do ciclo da cultura são ilustrados pela Figura 12. Pequenas discrepâncias observadas nos primeiros 15 dias podem ser explicadas pela pouca cobertura do solo associada às irrigações frequentes, o que pode favorecer variações nos valores de ETrc, apesar do baixo índice de área foliar.

No entanto ao observar-se a curva ajustada de Kc, verifica-se a sua variação característica, isto é, comportamento cúbico, gerando a equação 10, com $R^2 = 0,73$ dada por:

$$Kc = -4 \times 10^{-6} IC^3 + 0,0003 IC^2 + 0,004 IC + 0,6383 \quad (10)$$

Em que:

Kc – Coeficiente de cultura do feijoeiro;

IC – Idade da cultura (dias).

Pelo presente trabalho sugere-se, portanto, que o coeficiente de cultivo pode ser calculado com o uso da equação 10, em função da idade em dias da cultura do feijoeiro.

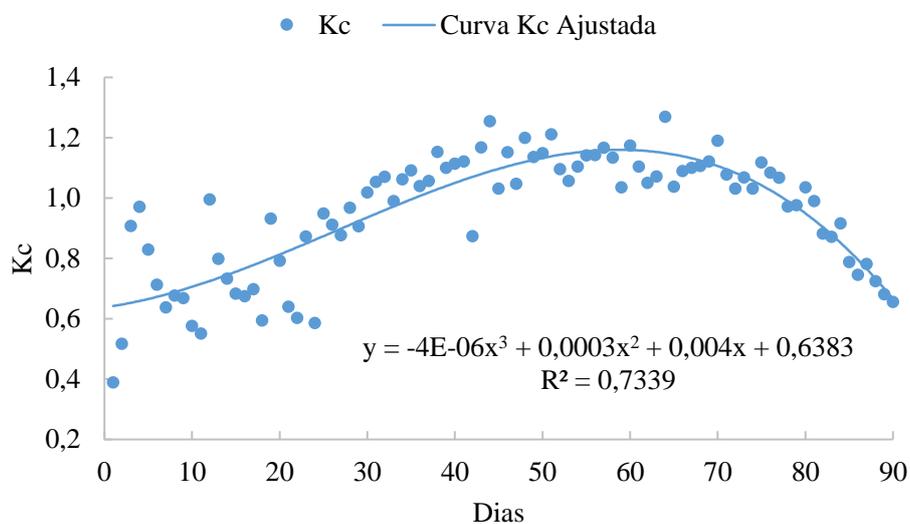


Figura 12. Valores diários do coeficiente de cultivo (Kc) determinados durante o ciclo da cultura do feijoeiro em um pivô central, localizado na região da Bacia do Ribeirão Buriti Vermelho, Distrito Federal, entre os meses de Abril a Agosto de 2015.

Dividindo os dados diários de Kc em períodos fenológicos do feijoeiro em inicial (20 dias), intermediário (60 dias) e final (10 dias), as médias determinadas foram respectivamente de 0,72; 1,05 e 0,80. Os valores de Kc para ao feijoeiro propostos por Allen et al. (1998) são de 0,5; 1,05 e 0,90 para os períodos inicial, médio e final, respectivamente. Dessa forma, os dados médios encontrados estão aproximadamente em conformidade com os indicados pelo autor.

Lima et al. (2011), utilizando a razão de Bowen para o cálculo da evapotranspiração da cultura e a equação de Penman-Monteith FAO para o cálculo da

ETo, encontraram coeficientes de cultivo médios de 0,99; 0,88 e 0,83 respectivamente para as fases vegetativa, reprodutiva e de maturação para o feijão-caupi em condições de sequeiro no estado da Paraíba. As diferenças em relação ao presente trabalho são devido às distintas condições de cultivo nos dois casos, além de se tratar de diferentes variedades de feijão e região de cultivo.

Para as condições do Vale do Gurguéia - PI, Bastos et al. (2008) determinando a evapotranspiração da cultura do feijão-caupi irrigado por meio de lisímetros de pesagem e evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith, encontraram coeficientes de cultivo de 0,8 para a fase inicial, 0,8 a 1,1 para a fase de crescimento e 1,4 a 0,3 para a fase final. As discrepâncias nos valores são em razão dos diferentes métodos de cálculo, diferentes variedades de feijão e regiões distintas.

Em Campos dos Goytacazes, RJ, Mendonça et al. (2007) determinaram o coeficiente de cultivo para o feijoeiro comum com a utilização de um lisímetro de pesagem para o cálculo da evapotranspiração da cultura e o método de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração de referência, onde encontraram os valores de 1,04; 1,34 e 0,34 para os períodos inicial, intermediário e final.

Bergamaschi et al. (1989) utilizando o balanço hídrico para o cálculo da evapotranspiração da cultura e o tanque Classe A para a evaporação de referência, encontraram valores máximos de Kc igual a 0,77 para a fase inicial, 1,07 para o período médio e 0,79 para o período final da cultura do feijoeiro em Piracicaba, SP. Esses valores de coeficiente de cultivo estão em conformidade com os encontrados no presente trabalho.

4. CONCLUSÕES

1. As entradas de água no solo durante o ciclo da cultura do feijoeiro foram menores do que a demanda evapotranspirométrica calculada pela razão de Bowen.
2. Os valores do conteúdo de umidade no solo dados pelo TDR diferiram daqueles calculados pelo balanço hídrico.
3. Os valores de Kc encontrados estão dentro da faixa daqueles fornecidos pela literatura pertinente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BASTOS, E. A. et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no vale do Gurguéia, Piauí. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 182-190, 2008.
- BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro. III. Evapotranspiração máxima e relações com a evapotranspiração calculada pelo método de Penman e com a evaporação do tanque "Classe A". **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 4, p. 387-392, 1989.
- 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.
- CALVACHE, A. M. et al. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. 3, p. 232-240, Dezembro 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.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome: FAO. 1984.

- 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.
- FIGUEIREDO, M. G. D. et al. Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de terra e aversão ao risco. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, p. 593-598, 2007.
- 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.
- LIMA, J. R. D. S. et al. Balanço de energia e evapotranspiração do feijão-caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.
- MENDONÇA, J. C. et al. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 471-475, 2007.
- MONTEIRO, J. E. B. A. Feijão. In: _____ **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p. 185-201.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and Environment. In: FOGG, G. F. **The state and movement of water in living organism**. Nova Iorque: Academic Press, 1965. p. 205-234.
- 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.
- NASCIMENTO, L. D.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. D. Demanda total de água do feijoeiro nos sistemas de plantio convencional e direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 159-161, 2001.
- 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.

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.

PHENE, C. J. Techniques for computerized irrigation management. **Comp. Electr. Agr.**, New York, v. 3, n. 3, p. 189-208, 1989.

SILVA, L. D. B. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum Jacq*) e grama-batatais (*Paspalum notatum Flugge*) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. 2003. 93 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

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.

SILVEIRA, P. M. D.; STONE, L. F. **Irrigação do Feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001.

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 28-32, 2001.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa 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.