

**RESPOSTA DO FEIJOEIRO COMUM A
LÂMINAS E ÉPOCAS DE SUSPENSÃO DA
IRRIGAÇÃO**

MÁRCIO JOSÉ DE SANTANA

2007

MÁRCIO JOSÉ DE SANTANA

**RESPOSTA DO FELJOEIRO COMUM A LÂMINAS E ÉPOCAS DE
SUSPENSÃO DA IRRIGAÇÃO**

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

Orientador

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

2007

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

Santana, Márcio José de

Resposta do feijoeiro comum a lâminas e épocas de suspensão da irrigação /
Márcio José de Santana. -- Lavras : UFLA, 2007.

102 p. : il.

Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Feijão. 2. Manejo de Irrigação. 3. Função de produção. 4. Coeficiente de
cultura. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-635.65287

MÁRCIO JOSÉ DE SANTANA

**RESPOSTA DO FELJOEIRO COMUM A LÂMINAS E ÉPOCAS DE
SUSPENSÃO DA IRRIGAÇÃO**

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

APROVADA em 30 de janeiro de 2007

Pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende	UFLA
Prof. Dr. Haroldo Silva Vallone	CEFET/BAMBUÍ
Prof. Dr. Messias José B. de Andrade	UFLA
Prof. Dr. Paulo César de Melo	UFLA

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

DEDICO AOS MEUS PAIS, CIRILO E MARIA JOSÉ,

por tudo que foram e são em minha vida: exemplo de humildade,
dignidade e luta. Novamente, essa conquista é de vocês.

OFEREÇO

**AOS MEUS IRMÃOS, ROSA, NATAL E
ADRIANA,**

pela presença, força e união durante esses anos.

E A KARIME,

pela companhia, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, por todos esses anos de apoio.

À CAPES, pela bolsa cedida nos primeiros anos de trabalho.

Ao orientador, Prof. Jacinto de Assunção Carvalho, pelos ensinamentos, atenção e amizade nesses anos de trabalho e sucesso.

Ao professor e co-orientador Messias J. Bastos de Andrade pelo conhecimento compartilhado e atenção durante este e outros trabalhos conduzidos.

Aos membros da banca avaliadora, a Pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende e os professores Dr. Haroldo Silva Vallone e Dr. Paulo César de Melo, pelas sugestões e auxílio final.

Aos engenheiros agrônomos Clênio Silva, José Carlos Braga, Gilson Gerson e Eduardo Branquinho, pela intensa, valiosa e imprescindível ajuda na condução do trabalho. Aos demais alunos da FACIAGRA/ UNIPAM, Patos de Minas, MG, que contribuíram, de alguma forma, para a condução do trabalho, representados, no momento, pelo Engenheiro Agrônomo Fernando Araújo.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas, MG, junto à FACIAGRA e ao amigo Rildo Araújo Leite, pela confiança depositada e incentivo em todos os momentos.

Ao grande amigo Antônio Carlos Barreto, pela presença, conselhos e amizade.

Aos colegas de curso Giuliano, Natalino, Alexandre e Carlinhos, pelo apoio e amizade; em especial, às amigas Joelma, Mirian e Polyanna.

Aos companheiros Alexandre Márcio, Douglas, Kleber e Reginaldo, pela ajuda e amizade durante o doutorado.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia (DEG/UFLA), pelo apoio técnico.

Aos meus familiares e demais amigos.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

A Deus, pela vida.

BIOGRAFIA

Márcio José de Santana, filho de Cirilo Felismino de Santana e Maria José Santana, nasceu em Patos de Minas, MG, em 12 de novembro de 1977.

Em 1993, iniciou o curso de Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica Afonso Queiroz, na cidade de Patos de Minas, MG, concluindo-o em 1995. Durante o ano de 1996, prestou serviços a empresas agrícolas na área de produção de sementes. Nesse mesmo ano, ingressou na Universidade Federal de Lavras, onde, em 2002, concluiu o curso de Agronomia. Em 2003, iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola, trabalhando com manejo de culturas irrigadas, concluindo-o em 2004. Nesse ano, iniciou o Doutorado em Engenharia Agrícola e em 2005 e 2006, prestou serviços ao Centro Universitário de Patos de Minas, MG (FACIAGRA/UNIPAM) nas áreas de Fitotecnia, Produção de Sementes e Manejo da Irrigação. Hoje é professor do CEFET/UBERABA, nas áreas de Irrigação e Olericultura.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT.....	ii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão.....	3
2.2 Manejo da irrigação.....	7
2.2.1 Déficit e excesso de água.....	8
2.2.2 Alguns resultados experimentais.....	11
2.3 Evapotranspiração.....	13
2.3.1 Evapotranspiração potencial (ETp)	15
2.3.2 Evapotranspiração de referência (ETo)	16
2.3.3 Evapotranspiração real (ER)	18
2.3.4 Evapotranspiração da cultura (ETc)	18
2.3.5 Balanço hídrico.....	19
2.3.5.1 Armazenamento de água no solo.....	19
2.3.5.2 Precipitação.....	19
2.3.5.3 Deflúvio superficial.....	20
2.3.5.4 Movimento da água no contorno inferior (drenagem profunda).....	21
2.3.5.5 Coeficiente de cultura (Kc).....	21
2.4 Análise econômica (função de produção)	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1 Caracterização da área experimental.....	24
3.2 Cultivar.....	26
3.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	26
3.4 Dados climáticos.....	27
3.5 Instalação e condução do experimento.....	28

3.6 Sistema e manejo da irrigação.....	28
3.7 Características avaliadas.....	31
3.7.1 Produtividade da cultura.....	31
3.7.2 Número e peso de grãos não colhidos.....	32
3.7.3 Número de vagens verdes.....	32
3.7.4 Peso de 100 grãos.....	32
3.7.5 Número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem.....	32
3.7.6 Diâmetro do colo das plantas.....	33
3.7.7 Massa seca das plantas.....	33
3.7.8 Eficiência do uso da água.....	33
3.8 Coeficiente de cultura.....	33
3.8.1 Balanço hídrico do solo.....	34
3.8.1.1 Precipitação e lâminas aplicadas.....	34
3.8.1.2 Deflúvio superficial (E)	34
3.8.1.3 Movimento da água no contorno inferior (Q)	35
3.8.1.4 Variação do armazenamento de água no solo.....	36
3.8.1.5 Evapotranspiração de referência.....	36
3.8.1.6 Evapotranspiração da cultura.....	37
3.9 Análises estatísticas.....	37
3.10 Eficiência econômica da lâmina de água (função de produção).....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSAO.....	43
4.1 Dados climáticos.....	43
4.2 Produtividade da cultura.....	45
4.3 Número e peso de grãos não colhidos.....	49
4.4 Número de vagens verdes.....	57
4.5 Peso de 100 grãos.....	58
4.6 Número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem.....	62
4.7 Diâmetro do colo das plantas.....	64

4.8 Massa seca das plantas.....	66
4.9 Eficiência do uso da água.....	68
4.10 Coeficiente de cultura.....	71
4.10.1 Precipitação e lâminas aplicadas.....	71
4.10.2 Deflúvio superficial.....	72
4.10.3 Movimento da água no contorno inferior.....	73
4.10.4 Armazenamento de água no solo.....	78
4.10.5 Evapotranspiração de referência.....	79
4.10.6 Coeficiente e evapotranspiração da cultura.....	80
4.11 Eficiência econômica da lâmina de água.....	86
4.12 Síntese dos resultados.....	91
5 CONCLUSÕES.....	94
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

RESUMO

SANTANA, Márcio José de. **Resposta do feijoeiro comum a lâminas e épocas de suspensão da irrigação.** 2007. 102p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

Este experimento foi conduzido no campus II do Centro Universitário de Patos de Minas (Unipam), em Patos de Minas, MG, durante o ano de 2005. Os objetivos foram avaliar o rendimento do feijoeiro comum cultivar Talismã submetido a diferentes níveis de reposição da água de irrigação, determinar os valores do coeficiente de cultura (Kc), determinar a lâmina ótima econômica e a época de suspensão da irrigação para a cultura. Os tratamentos constaram de cinco níveis de reposição de água no solo (40%, 70%, 100%, 130% e 160%) em função da lâmina, para elevá-lo, diariamente, à capacidade de campo e três épocas de suspensão da irrigação (0, 7 e 14 dias após atingir o estágio R9 do ciclo cultural). Utilizou-se, para a irrigação, um sistema por microaspersão. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial de 5x3, com quatro blocos. Foram avaliados: produtividade da cultura, número e peso de grãos não colhidos, número de vagens verdes, número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem, diâmetro do colo das plantas, massa seca, eficiência do uso da água, coeficientes de cultura (Kc) e lâminas ótimas física e econômica. A cultura do feijoeiro cultivar Talismã quando submetida às lâminas deficitárias, bem como excessivas, teve reduzida negativamente a maioria de suas características. Os valores de Kc foram diferentes dos obtidos por diversos autores pesquisados, o que determina a importância de obtenção em cada região de estudo. Os valores de Kc(s) médios para os estágios inicial, I, II, III e IV foram, respectivamente, de 0,5; 0,53; 0,81; 1,07 e 0,78. As médias de produtividade observadas, quando se irriga com 100% de reposição e suspensão em R9, R9+7 e R9+14, não foram estatisticamente diferentes. Quando foram estimadas as lâminas ótimas econômicas, o maior lucro foi verificado quando a irrigação foi suspensa em R9+14.

¹ Comitê Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho - UFLA (Orientador), Messias José Bastos de Andrade (Co-orientador) - UFLA.

ABSTRACT

SANTANA, Márcio José de. **Response of the common bean plant to irrigation heights and withholding times.** 2007. 102p. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering/Irrigation and Drainage) – Federal University of Lavras, Lavras.²

This experiment was conducted on campus II of the Patos de Minas University Center (Unipam), in Patos de Minas, MG, during the year of 2005. The purposes of evaluating the yield of the common bean plant, cultivar Talismã, submitted to different levels of irrigation water replacement, determining the values of cropping coefficients (Kc), determining the optimum economic height and irrigation withholding time for the crop. The treatments consisted of five levels of water replacement in soil (40%, 70%, 100%, 130% and 160%) as related with the height to raise it daily to field capacity and three irrigation withholding times (0, 7 and 14 days after reaching R9 stage of the cropping cycle). A microsprinkling system was utilized for irrigation. The experimental design was randomized blocks in a factorial scheme of 5x3 with four blocks. Crop yield, number and weight of unharvested grains, number of green pods number of grains per plant, pods per plant and grains per pod, diameter of the connecting point between stem and root of the plants, dry mass, water use efficiency cropping coefficients (Kc) and optimum physical and economic water heights were evaluated. The crop of the common bean plant, cultivar Talismã, when submitted to deficient water heights as well excessive ones, reduced negatively most of its characteristics. The Kc values were different from the several authors studied, which determines the importance of obtaining in each study region. The values of average Kc(s) for the stages: initial, I, II, III and IV were respectively of 0.5; 0.53; 0.81; 1.07 and 0.78. The means of yield observed when irrigating with 100% of replacement and withholding at R9, R9+7 and R9+14, were statistically different. When the optimum economic heights were estimated, the highest profit was found when irrigation was withheld at R9+14.

² Guidance Committee: Jacinto de Assunção Carvalho - UFLA (Adviser), Messias José Bastos de Andrade (Co-adviser) - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) destaca-se como uma das principais culturas do país, porém, a média brasileira de produtividade é baixa, em torno de 820 kg ha⁻¹ (CONAB, 2006), como consequência do baixo emprego de insumos e de tecnologia.

Dentre os tratos culturais, a irrigação constitui alternativa viável para a substancial melhoria da produtividade. A finalidade básica da irrigação é proporcionar água à cultura, de maneira a atender toda a exigência hídrica durante todo o ciclo cultural. Este é o propósito quando se desejam produção máxima e produto de boa qualidade. Todavia, irrigações e sistemas mal dimensionados, com aplicações em excesso ou com déficit, poderão comprometer essa produtividade.

O feijoeiro é cultivado em muitas regiões, como no Alto Paranaíba e no Triângulo Mineiro, Minas Gerais, em três safras bem definidas: a) verão, quando a semeadura concentra-se nos meses de outubro e novembro, normalmente não necessitando de irrigação; b) safra da seca, cuja semeadura se concentra nos meses de março e abril, com necessidade de irrigações complementares e c) safra de inverno, quando a semeadura é realizada nos meses de maio a julho, sendo a irrigação imprescindível. O que deve ser levado em consideração é que os produtores ainda não se preocupam com o manejo adequado da água no solo, sendo a quantidade de água aplicada obtida com a experiência individual e empírica, resultando em valores que podem proporcionar lâminas inadequadas.

Faltam informações e pesquisas em diversos temas relacionados à relação água-solo-planta em determinados locais. Devem ser realizados trabalhos que estudem alguns aspectos, como a quantidade de água a ser aplicada de acordo com cada cultivar e solo, os coeficientes de cultura (Kc) a serem usados nas diversas fases, a resposta da cultura ao déficit e ao excesso de água e lâmina

ótima econômica, dentre outros. Esses estudos, preferencialmente, deverão estar ligados à realidade do produtor.

Outro problema enfrentado por produtores é a decisão a sobre época de suspender a irrigação do feijoeiro. Alguns irrigam até vésperas da colheita, enquanto outros interrompem no início do estágio R9 (mudança da cor das vagens ou maturidade das vagens).

Nota-se, portanto, que são necessários estudos regionais que contemplem os temas mencionados, buscando solucionar problemas e dúvidas de profissionais e agricultores em cada local, evitando o emprego de informações generalizadas.

Diante do exposto, o presente trabalho foi realizado com os objetivos de avaliar o desempenho do feijoeiro comum submetido a diferentes níveis de reposição de água no solo, determinar os valores de coeficiente de cultura (K_c) para a região de Patos de Minas, MG, determinar o efeito das lâminas de água nas produtividades física e econômica da cultura e avaliar a melhor época de suspensão da irrigação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão

A importância econômica e social da cultura do feijão para o Brasil é inquestionável. O feijão destaca-se como importante fonte de proteína na dieta alimentar do povo brasileiro, sendo um prato quase obrigatório das populações rural e urbana. É cultivado nos mais variados tipos de solo, clima e sistemas de produção, tais como o cultivo solteiro, consorciado ou, ainda, intercalado com uma ou mais espécies (Yokoyama et al., 1996). O feijão representa, ainda, importante fonte de diversos nutrientes e fibra, embora sua composição possa variar de acordo com o local de plantio, fatores ambientais e com a cultivar (Araújo et al., 1996). A área plantada na safra 2005/2006 foi de, aproximadamente, 4.200.000 hectares, resultando em uma produção nacional de 3.448.000 toneladas do produto (CONAB, 2006).

O feijoeiro comum pertence à família Fabaceae (Leguminosae), gênero *Phaseolus*, espécie *Phaseolus vulgaris* L. Possui um sistema radicular ramificado, no qual a raiz principal (pivotante) salienta-se por seu diâmetro e posição oposta ao caule. Após a emergência desenvolvem-se as raízes secundárias no colo da raiz principal. A amplitude do sistema radicular varia segundo as condições físicas do solo, tais como estrutura, porosidade, aeração, capacidade de retenção de umidade e temperatura, entre outras. Aproximadamente 90% das raízes concentram-se em uma faixa de solo com profundidade de 20 cm (resultando em problemas de déficit hídrico, nutricional e de acamamento). O caule é o eixo principal da parte aérea da planta e tem origem a partir do meristema apical do embrião, situado no ápice do epicótilo. Acima das folhas primárias, o caule desenvolve-se de forma dinâmica e ascendente, originando uma sucessão de nós e entrenós. As folhas se apresentam

em dois tipos: simples e compostas. As únicas folhas simples são as primárias, já presentes no embrião e as demais folhas do feijoeiro são compostas e são características desta espécie, inserindo-se nos nós do caule e das ramificações. O fruto é um legume (Araújo et al., 1996).

Conforme Fancelli & Dourado Neto (1997), as fases de desenvolvimento na cultura do feijão não apresentam nítida separação, principalmente quando consideradas plantas de hábito de crescimento indeterminado, constatando-se sobreposições representadas pela possibilidade de emissões simultâneas de folhas, flores e vagens. Esse fato deve ser considerado por ocasião da elaboração de recomendações técnicas e de manejo. A duração das etapas de desenvolvimento do feijoeiro pode ser afetada por alguns fatores, dentre os quais merecem especial destaque o genótipo (o qual determina o hábito de crescimento e precocidade das plantas), o clima e as condições de fertilidade do solo. Na Tabela 1 são resumidas as fases e estágios fenológicos do ciclo cultural do feijoeiro comum.

TABELA 1. Resumo das fases e estágios fenológicos do feijoeiro comum.

	Estágios	Característica
Vegetativo	V0	Início germinação
	V1	Cotilédones no nível do solo
	V2	Folhas primárias expandidas
	V3	Primeira folha trifoliolada
	V4	Terceira folha trifoliolada
Reprodutivo	R5	Botões florais
	R6	Abertura da primeira flor
	R7	Aparecimento das vagens
	R8	Primeiras vagens cheias
	R9	Modificação da cor das vagens (maturidade fisiológica)

Fonte: Adaptação Fancelli & Dourado Neto (1997).

Esses mesmos autores mencionam que o estágio R9 é caracterizado pela mudança da cor das vagens (amarela ou pigmentada, de acordo com a cultivar). As sementes adquirem sua cor e brilho finais e o processo de senescência da planta se acelera. A evolução normal dessa etapa exige ausência ou baixa disponibilidade de água.

Entre os legumes de grãos comestíveis, é a espécie que apresenta a mais ampla distribuição geográfica, sendo atualmente cultivada em todos os continentes, em regiões com amplitude térmica entre 10°C e 35°C. A maior parte da produção de feijão, todavia, é procedente de microrregiões com temperaturas médias variando de 17°C a 25°C, faixa térmica considerada ótima para a espécie. Nas regiões aptas ao cultivo, a época de semeadura deve ser determinada para que a floração ocorra, preferencialmente, quando a temperatura ambiente for próxima a 21°C. Altas temperaturas na fase vegetativa inicial podem causar a morte de plântulas e, conseqüentemente, redução no estande da cultura, sobretudo no sistema de plantio convencional, devido ao aquecimento da camada superficial do solo. Na fase de intenso crescimento vegetativo, o calor excessivo aumenta a fotorrespiração, reduzindo a taxa de crescimento das plantas, principalmente se acompanhado de seca. No período compreendido entre a diferenciação dos botões florais até o enchimento dos grãos nas vagens, as temperaturas elevadas causam redução nos componentes de rendimento, notadamente no número de vagens por planta, devido à esterilização do grão de pólen e a conseqüente queda de flores. A taxa de abscisão de flores e vagens pequenas é uma das maiores limitações no rendimento do feijoeiro e pode atingir índices elevados quando temperaturas diurnas e noturnas forem superiores a 30°C e 25°C, respectivamente. A ocorrência de temperaturas inferiores a 15°C na fase vegetativa retarda o crescimento das plantas; quando estas ocorrem na diferenciação das estruturas reprodutivas, provocam, em alguns casos, redução no número de grãos por vagem. Na faixa térmica de 2°C a 10°C, as plantas

reduzem a produção de biomassa e retardam seu desenvolvimento, devido a alterações metabólicas provocadas pelo resfriamento (Silveira & Stone, 2001).

A luz é imprescindível ao processo fotossintético de assimilação do dióxido de carbono, o qual, juntamente com a água e os nutrientes, forma as substâncias de reserva das plantas. Nas condições tropicais, a intensidade luminosa não constitui fator limitante, exceto quando ocorrem períodos de intensa nebulosidade, que reduzem a taxa fotossintética e, conseqüentemente, o crescimento das plantas. Quando o tempo nublado for acompanhado de alta umidade relativa do ar, nas condições térmicas favoráveis, poderá propiciar a ocorrência de determinadas doenças (Araújo et al., 1996).

As baixas produção e produtividade têm sido atribuídas ao uso de cultivares pouco produtivas, aos efeitos desfavoráveis do solo (principalmente baixa fertilidade, pela expansão da cultura para áreas marginais), às condições adversas de clima e à incidência de pragas e doenças (Garrido, 1998).

Para Libardi (1996), o baixo rendimento é provocado por vários fatores, além do uso inadequado de cultivares e condições edafo-climáticas inadequadas das regiões produtoras: baixo nível de adoção de tecnologias, uso de sementes de baixo vigor, ocorrência de variados problemas fitossanitários e oscilações meteorológicas. Neste último caso, verifica-se que a variação da disponibilidade de água é um fator importante para a redução do rendimento, dado o aparecimento de deficiência hídrica.

O feijão é, tradicionalmente, cultivado nas épocas das “águas” e das “secas”. Há, porém, em algumas regiões, uma terceira época, a de “inverno”. A safra das “águas” coincide com a época em que as precipitações permitem alguma produção sem a prática da irrigação e apresenta como inconveniente o risco de ocorrência de chuvas no período de colheita, o que pode comprometer a produção. No caso das safras da “seca” e de “inverno”, ambas estão sujeitas à ocorrência de períodos secos ao longo de seu desenvolvimento (Libardi, 1996).

Stone & Moreira (1986) afirmam que, devido aos riscos inerentes às safras das águas e da seca, a utilização de insumos, pelos produtores, é muito pequena. Com o plantio de inverno, além de se reduzirem os riscos, obtêm-se grãos de boa qualidade fitossanitária (podendo ser comercializados como sementes), oferta do produto na entressafra e facilidade na obtenção de mão-de-obra.

Hoje, no Brasil, a chamada safra de inverno é responsável por 867.000 toneladas de grãos de feijão (25% da produção nacional), numa área plantada de 935.000 hectares (22% da área plantada), com produtividade média maior que a média das três safras (821 kg ha⁻¹). Entretanto, ainda é considerada baixa, em torno de 927 kg ha⁻¹, conforme dados da CONAB (2006).

2.2 Manejo da irrigação

Conforme já mencionado, a produtividade da cultura do feijoeiro é função de vários fatores, como qualidade de sementes, cultivar, clima e aspectos físico-químicos do solo. Dentre os fatores climáticos, a precipitação pluviométrica é uma das principais causas do insucesso na obtenção da alta produtividade de feijão. Em regiões nas quais a distribuição de chuvas é irregular, podem ocorrer perdas significativas, principalmente quando a falta ou o excesso de água ocorrem na fase mais sensível. Nesses casos, a irrigação é uma tecnologia que pode não só reduzir os riscos de insucessos, como também aumentar a produtividade do feijão e, até, proporcionar maior número de safras durante o ano (Rezende, 2000).

Quanto ao clima, pelo fato de a maior parte da produção de feijão corresponder ao plantio das águas, há grande dependência da distribuição de chuvas, geralmente muito irregular ou insuficiente, resultando em significativas quedas da produção e do rendimento. Isso é notório quando a insuficiência ocorre em períodos críticos. Conseqüentemente, justifica-se o uso da irrigação

como meio de garantir maior produtividade e maior estabilidade na produção de feijão. Todavia, irrigações mal conduzidas, com aplicação inadequada de água, podem comprometer o desenvolvimento e a produtividade da cultura, haja vista que o feijoeiro é considerado sensível à falta ou ao excesso de água. Há necessidade, portanto, de maior conhecimento a respeito do requerimento hídrico do feijoeiro para adequar o manejo da água às necessidades, no intuito de propiciar condições ambientais mais favoráveis para otimizar a produtividade (Garrido, 1998).

A irrigação é imprescindível para a produção de inverno, pois o feijoeiro é classificado como planta sensível ao estresse hídrico, principalmente em virtude da sua baixa capacidade de recuperação após o déficit, do seu sistema radicular pouco desenvolvido (Guimarães, 1988) e do fato de ter uma baixa capacidade fotossintética (Lopes et al., 1987).

2.2.1 Déficit e excesso de água

A tolerância ao déficit hídrico é uma característica muito importante em qualquer cultivo. Dessa forma, é imperativo o conhecimento da resposta de diferentes cultivares ao déficit hídrico nos períodos fenológicos de maior demanda de água, a fim de se adequar o planejamento das culturas, assim como o eficiente manejo dos sistemas de irrigação (Libardi, 1996).

Silveira & Stone (2001) mencionam que o feijoeiro é considerado pouco tolerante ao déficit hídrico severo e a falta de água constitui um dos principais fatores limitantes ao rendimento da cultura, principalmente quando ocorre na fase reprodutiva da planta. Deficiência hídrica moderada na fase vegetativa inicial causa pequena redução no rendimento, porém, estresse hídrico prolongado nas semanas que antecedem a floração restringe o crescimento vegetativo, causando reduções consideráveis na produção de grãos. A fase de

desenvolvimento mais sensível ao déficit hídrico, no entanto, situa-se entre a formação dos botões florais e o enchimento dos grãos nas vagens. Neste período são determinados, seqüencialmente, os componentes de rendimento: número de vagens por planta, número de sementes por vagem e peso unitário da semente.

As áreas aptas à produção de feijão devem apresentar precipitações anuais entre 500 e 1.500 mm, porém, a quantidade de chuva para suprir a demanda durante o ciclo da cultura varia de 300 a 400 mm, dependendo da capacidade de retenção de água do solo (Silveira & Stone, 2001).

Conforme Doorenbos & Kassam (1979), as necessidades hídricas exigidas para a produção máxima do feijoeiro estariam entre 300 e 500 mm, sendo a variação deste valor dependente das condições climáticas locais. Fancelli (1987) indica que a cultura do feijoeiro exige um mínimo de 250 mm de água, sendo muito mais importante a sua distribuição do que a disponibilidade total, refletindo, principalmente, nos períodos considerados críticos quanto à exigência de água: emergência, início do florescimento e formação de vagens.

Os efeitos do déficit hídrico iniciam-se quando a taxa de evapotranspiração supera a taxa de absorção de água pelas raízes e sua transmissão para a parte aérea da planta. O déficit hídrico está associado, portanto, a uma redução progressiva da água no solo, acompanhando a profundidade radicular. Quanto maior a redução, mais severo o déficit. A maioria das culturas possui períodos críticos, durante os quais a deficiência hídrica causa decréscimos na produção. Para o feijoeiro, esses períodos já estão bem determinados (V0/V1, R6 e R8). Deve-se levar em consideração também que, independente da magnitude do estresse hídrico, cultivares de feijoeiro respondem diferentemente ao déficit de água no solo (Doorenbos & Kassam, 1979).

Oliveira (1987), trabalhando com déficit aplicado em diferentes fases do ciclo da cultura do feijoeiro, observou que a produção de matéria seca total é

extremamente sensível à ocorrência de estresse na fase de crescimento das plantas. Detectou ainda, que, dentre os componentes de produção, o número de vagens por planta foi o mais afetado pela falta de água no solo, principalmente quando esta ocorreu na fase de frutificação. Este autor não encontrou alteração no tamanho das sementes, em função de déficit hídrico.

A maneira como o déficit hídrico se manifesta na planta é bastante complexa, pois afeta praticamente todos os aspectos do crescimento, incluindo modificações anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. No entanto, os prejuízos causados estão em função direta da sua duração e severidade, e do estágio de desenvolvimento da planta em que ele ocorre (Kramer, 1983).

Garrido et al. (1979), nas condições do Norte de Minas Gerais, verificaram que o déficit de umidade ocorrido no início e no final da floração, ou no início de formação e no crescimento das vagens provocou, respectivamente, reduções de 16%, 42% e 58% na produção, em relação ao cultivo sem déficit hídrico.

O feijoeiro é considerado sensível ao excesso de umidade no solo (Forsythe & Pinchinat, 1971, citados por Garrido, 1998; Silva, 1982). Silva (1982), trabalhando com várias frequências e tempos de inundação, constatou que períodos de inundação superiores a dois dias tiveram efeito prejudicial significativo sobre a área foliar durante o período vegetativo do feijoeiro e que a inundação na floração é muito prejudicial ao rendimento. O componente de rendimento mais afetado foi o número de vagens por planta.

O aumento da resistência ao movimento de água através das raízes, a diminuição da absorção de nutrientes, o aumento da concentração de substâncias tóxicas na planta e a diminuição do crescimento e do potencial de água na folha são outros aspectos negativos que ocorrem quando há excesso de água. Além disso, há o favorecimento à incidência de doenças radiculares. Em condições de

encharcamento, o aparecimento de raízes adventícias é muito comum e facilmente observado (Fancelli & Dourado Neto, 1997).

O excesso de água no solo provoca redução da absorção de potássio e da nitrificação, aumento da desnitrificação e da lixiviação de nitratos, e redução da absorção de nutrientes (Power, 1990).

Veen (1981), citado por Garrido (1998), estimou que a respiração para absorção iônica e para processos de transporte representava, aproximadamente, 60% do total da respiração radicular. Assim, uma redução da aeração do solo por excesso de água aplicada provocará redução da absorção de nutrientes.

2.2.2 Alguns resultados experimentais

Carvalho (1992), trabalhando com a cultivar Carioca, em Sete Lagoas, MG, testou o efeito de quatro lâminas de água (no intervalo de 272 a 416 mm) e quatro formas de parcelamento de 90 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cobertura. O efeito das lâminas foi superior ao do nitrogênio sobre a produção de grãos. A análise de regressão mostrou resposta quadrática do feijoeiro às lâminas de água, com rendimento máximo estimado de 2.112 kg ha⁻¹ para uma lâmina de 360 mm.

Caixeta et al. (1978), estudando o comportamento do feijoeiro sob quatro lâminas de água (100, 200, 300 e 400 mm) e três níveis de fertilizantes (50, 100 e 150% de 20 kg ha⁻¹ N, 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O), observaram efeito significativo dos níveis de água sobre o número de vagens por planta e sobre a produção de feijão. Não houve resposta à adubação e à interação de água versus adubação.

Estudando o comportamento da cultura do feijoeiro em diferentes regimes de água, Stansel & Smittle (1980) observaram que o manejo da água no solo, na profundidade de 0-30 cm, foi adequado para altas produtividades de

grãos, embora a planta tenha extraído água da camada de 30- 45 cm do perfil do solo. Observaram também que a produção de vagens foi maior quando a irrigação era feita durante todo o ciclo da cultura.

Bernardo et al. (1970), estudando a cultura do feijoeiro irrigado sob diferentes tensões de água no solo (50 kPa, 65 kPa e 75 kPa), a 10 cm de profundidade, observaram que a produção diminuiu quando a tensão aumentou.

Lopes et al. (1987), analisando os efeitos do déficit hídrico sobre o feijoeiro, concluíram que o número de folhas e de vagens foi sensivelmente reduzido pela deficiência de água ao longo do ciclo da cultura; o déficit hídrico reduziu também a altura média das plantas, enquanto que plantas não submetidas ao déficit tiveram o alongamento do caule favorecido.

Magalhães et al. (1979) estudaram os efeitos do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas sobre a produção do feijão e concluíram que o período mais crítico foi o do início da floração à plena floração, no qual níveis de potencial matricial no solo de -50 kPa causaram 36,85% de redução no rendimento. Encontraram menor número de vagens por planta no tratamento em que o déficit se dava na fase do início da floração à plena floração, o qual também apresentou menor produção de grãos. Não encontraram, porém, diferenças significativas quanto ao número de grãos por vagem.

Alvino et al. (1988), estudando os efeitos que limitam o rendimento do feijoeiro, constataram redução de 65% na produção, correspondente ao tratamento com intervalos longos entre irrigações (a cada 120 mm de evaporação do tanque Classe A), quando comparado ao tratamento em que as irrigações eram efetuadas a cada 15 mm de evaporação do tanque Classe A. Também concluíram que, nos intervalos maiores, ou seja, com menor disponibilidade hídrica, ocorreram reduções na ordem de 52%, 13% e 16% no número de vagens por planta, número de sementes por vagem e peso de 100

sementes, respectivamente, quando comparados ao tratamento de maior disponibilidade de água.

Usando dados de vários estudos conduzidos no Centro de Pesquisa dos Trópicos do Semi-Árido em Petrolina, PE, Millar & Choudhury (1980) observaram que 80% e 90% do potencial de produção da cultura do feijoeiro são obtidos com manejo de irrigação que forneça água ao solo quando o mesmo apresentar uma tensão de 75 e 170 kPa, respectivamente.

Essa leguminosa necessita de baixa tensão de água no solo para que o seu potencial produtivo seja manifestado (Peloso et al., 1996). Garrido & Teixeira (1978) não observaram diferenças significativas no seu rendimento quando a tensão da água nos primeiros 30 cm de profundidade do solo esteve a 20, 40 e 60 kPa. Stone & Moreira (1986) sugeriram o reinício da irrigação quando a tensão da água do solo, medida com tensiômetro, atinge a faixa de 25 a 30 kPa, enquanto Saad et al. (1992) recomendaram irrigar quando a tensão da água no solo apresenta valores de 30 a 70 kPa.

A eficiência da utilização da água pela cultura, ou seja, o consumo de água em relação ao rendimento obtido, é um parâmetro de grande importância, sobretudo em locais em que a atividade de produção de feijão é diretamente determinada pela prática da irrigação, refletindo na rentabilidade e na eficiência da produção. Para a cultura do feijoeiro, o valor da eficiência de uso da água, no caso da produção de grãos com umidade de 10%, é da ordem de 0,3 a 0,6 kg m⁻³ (Doorenbos & Kassam, 1979).

2.3 Evapotranspiração

Evapotranspiração é a perda de água para atmosfera, em forma de vapor, pelos processos de evaporação das superfícies e transpiração das plantas. A transpiração aumenta com o desenvolvimento da cultura, atingindo valores máximos no estágio de floração, quando as plantas cobrem totalmente o solo; a

evapotranspiração apresenta comportamento semelhante, pois a transpiração é seu componente mais importante, uma vez que a evaporação do solo diminui com o desenvolvimento da cultura. Na agricultura irrigada, o conhecimento da evapotranspiração máxima nos diferentes estádios de desenvolvimento das plantas cultivadas é fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (Bernardo, 1996).

Segundo Pavani (1985), a determinação da evapotranspiração é de grande importância para o planejamento e dimensionamento de projetos e do manejo de água em áreas irrigadas, não só no aspecto físico e biológico como também no de engenharia. Isso porque as obras e os equipamentos hidráulicos são dimensionados em função da vazão que, por sua vez, depende da evapotranspiração.

Em geral, os resultados mostram que os maiores valores de evapotranspiração ocorrem na fase reprodutiva, ou seja, durante a floração e a frutificação do feijoeiro. São esses os valores que devem ser considerados para fins de planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação (Garrido, 1998).

O planejamento e a operação de um projeto de irrigação que vise à máxima produção e boa qualidade do produto, usando de maneira eficiente a água, requerem conhecimento das inter-relações entre solo-água-planta-atmosfera. O ponto chave no manejo da irrigação é decidir quando e quanto aplicar a água. A quantidade a ser aplicada pode ser calculada como sendo a água consumida pela cultura dividida pela eficiência do sistema, enquanto a quantidade de água consumida pode ser estimada pela evapotranspiração real (ET_r) (Bernardo, 1996).

Os estádios de crescimento das plantas apresentam diferentes necessidades de água. Um procedimento para se quantificar essas necessidades é a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o). Por intermédio de um

coeficiente apropriado, denominado coeficiente de cultura (K_c), pode-se estimar a evapotranspiração de uma cultura em seus diferentes estádios. Diversos são os métodos para a estimativa da E_{To} , sendo o do tanque Classe A amplamente utilizado, por sua simplicidade e custo relativamente baixo (Sediyama et al., 1998).

A evapotranspiração pode ser determinada por métodos diretos ou estimada de forma indireta, a partir de elementos climáticos, utilizando-se modelos teóricos ou empíricos (Antunes et al., 2000).

Segundo Guandique (1993), a evapotranspiração pode ser determinada com a utilização métodos classificados em três categorias: os de balanço hídrico, os micrometeorológicos e os empíricos.

2.3.1 Evapotranspiração potencial (E_{Tp})

Penman (1956), citado por Machado (1988), definiu a evapotranspiração potencial como sendo o processo de transferência de água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo.

Em relação à evapotranspiração, distinguem-se, pelo menos, três conceitos: evapotranspiração potencial (E_{Tp}), que depende exclusivamente das condições atmosféricas, pois não tem restrições de umidade no solo; evapotranspiração atual ou real (E_{Ta}), que depende de fatores da planta, das condições meteorológicas e de fatores do solo, principalmente da disponibilidade de água e evapotranspiração máxima (E_{Tm}), que depende do desenvolvimento e da fisiologia da planta (Rosemberg et al., 1983, citados por Garrido, 1998).

2.3.2. Evapotranspiração de referência (ET_o)

A evapotranspiração de referência refere-se à evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira, na qual as dimensões meteorológicas são realizadas para a obtenção de um conjunto consistente de dados de coeficientes de cultura a serem utilizados na determinação da evapotranspiração de outras culturas agrícolas. A Organização das Nações Unidas, por intermédio da FAO, estabeleceu o conceito de evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) em publicação mundialmente conhecida como “Guidelines for Crop Water Requirements” (Boletim FAO-24). No Brasil, ele tem sido amplamente adotado e utilizado por engenheiros, pesquisadores e extensionistas (Sediyama et al., 1998).

Com base principalmente no boletim FAO 24, a partir dos anos 1980, a terminologia evapotranspiração de referência (ET_o) é preferida à evapotranspiração potencial (ET_p) (Andrade et al., 1998).

A evapotranspiração de referência pode ser estimada por meio de equações, medida diretamente com auxílio de lisímetros ou medida indiretamente, por meio de tanques evaporimétricos.

A quantidade de água transferida para a atmosfera a partir de uma superfície de água livre (evaporímetros) será diferente da transferência de água em uma superfície vegetada. Porém, a variação é dependente dos mesmos parâmetros meteorológicos em ambos os casos, o que permite encontrar coeficientes que relacionem a evapotranspiração potencial com a evaporação de um tanque, desde que se mantenha o estado sanitário da planta e a umidade do solo não interfira no processo (Castro Neto, 1980, citado por Oliveira, 2003).

O tanque Classe A, em virtude do custo relativamente baixo e do fácil manejo, tem sido empregado no manejo da irrigação. Ele tem a vantagem de medir a evaporação de uma superfície de água livre, associada aos efeitos

integrados da radiação solar, do vento, da temperatura e da umidade do ar, possuindo dimensões padronizadas, conforme relata Bernardo (1996).

Pelo fato de os processos de evaporação da água livre no tanque (EV) e a ETo serem semelhantes apenas nos seus aspectos físicos, para converter EV em ETo, as condições meteorológicas da região e o local em que o tanque está instalado em relação ao meio circundante devem ser considerados. Para a obtenção da evapotranspiração de referência, são necessários dados da evaporação do tanque classe A e do coeficiente de correção para o tanque Kt. Na Tabela 2, são encontrados os valores de Kt do tanque classe A em diversas situações. Existe um grande número de equações baseadas em dados meteorológicos para cálculo da ETo. Em testes realizados no Brasil, a equação de Penman-Monteith é a que tem melhor se ajustado aos valores medidos em evapotranspirômetros, apesar de trabalhosa e de exigir o conhecimento de grande número de parâmetros meteorológicos (Oliveira, 2003).

TABELA 2. Coeficientes de correção Kt para o tanque classe A.

Vento (m s ⁻¹)	Tanque circundado por grama				Tanque circundado por solo nu			
	Posição tanque R* (m)	UR% (média)			Posição tanque R* (m)	UR% (média)		
		<40%	40- 70%	>70%		<40%	40- 70%	>70%
<2	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
2-5	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,65	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,70	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,75	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
5-8	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,65	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,75
	100	0,60	0,65	0,75	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55

*R= entende-se a menor distância do centro do tanque ao limite da bordadura. Fonte: Doorenbos & Kassam (1994).

2.3.3 Evapotranspiração real (ER)

Segundo Pereira et al. (1997), a evapotranspiração real é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo. Assim, ER é aquela que ocorre em qualquer circunstância, sem a imposição de qualquer condição de contorno.

2.3.4 Evapotranspiração da cultura (ET_c)

Desde o plantio até a colheita, uma cultura vai progressivamente crescendo e ocupando área disponível. Evidentemente, nessas condições, ocorre a ER que, na prática, é denominada de evapotranspiração da cultura (ET_c). O conhecimento de ET_c representa a quantidade de água a ser adicionada ao solo, para manter o crescimento e a produção em condições ideais (Oliveira, 2003).

Stansel & Smitlle (1980) determinaram, por meio da equação hidrológica, uma evapotranspiração média diária na cultura do feijoeiro da ordem de 3,22 mm, com um total de 193 mm. Reichardt et al. (1974) realizaram um balanço hídrico em cultura de feijoeiro durante 48 dias, em Piracicaba, SP, e encontraram evapotranspiração média de 3,45 mm dia⁻¹ e evapotranspiração máxima, durante a floração, de 5,3 mm dia⁻¹. Luchiari (1978), também em Piracicaba, SP, por meio de balanço hídrico, observou que a evapotranspiração média, do plantio à etapa de maturação dos frutos, foi de 3,06 mm dia⁻¹, enquanto, na floração, o valor foi de 3,4 mm dia⁻¹.

A evapotranspiração da cultura pode ser estimada por intermédio de ET_o, como segue: $ET_c = K_c \cdot ET_o$

2.3.5 Balanço hídrico

De acordo com Guandique (1993), o balanço hídrico pode ser realizado por meio de uma série de dados climatológicos disponíveis em um local, como também por meio de dados obtidos num volume de controle no solo, assim referindo-se aos balanços hídrico climatológico e do solo, respectivamente. Para os dois casos, podem ser estabelecidos intervalos de tempo variáveis, que dependerão do estudo a ser realizado.

2.3.5.1 Armazenamento de água no solo

Para a determinação do armazenamento de água no solo, utiliza-se o método gravimétrico direto ou equipamentos como o tensiômetro e a sonda de nêutrons. Guandique (1993) menciona trabalho realizado por Costa (1990), que observou que, em períodos chuvosos, podem ocorrer limitações na medição diária da evapotranspiração, devido à dificuldade de determinação da variação da lâmina de água armazenada no solo.

2.3.5.2 Precipitação

A precipitação pluvial representa a principal entrada de água nos cultivos de sequeiro e, nos cultivos sob irrigação, a sua quantificação possibilita determinar se há necessidade de sua suplementação. A quantificação se dá por pluviômetros ou pluviógrafos.

2.3.5.3 Deflúvio superficial

O escoamento superficial depende da interação entre a intensidade de precipitação e ou a taxa de aplicação da irrigação com a capacidade de infiltração do solo, sendo, ainda, influenciado pelo declive da área, tipo e densidade da cobertura vegetal, práticas de manejo e conservação do solo e tipo de cultura. Embora de difícil quantificação, a sua determinação pode ser alcançada pelo confronto do total precipitado acumulado com as lâminas que potencialmente o solo permitiria infiltrar ou, ainda, pela instalação de coletores de deflúvio superficial em pequenas parcelas dentro da área, o que pode permitir uma estimativa com razoável precisão, conforme Reichardt (1985).

Esse mesmo autor define infiltração como o processo pelo qual a água entra no solo. A velocidade de infiltração é um dos fatores chaves para uma irrigação bem planejada. Esta velocidade é que determina quanto tempo e qual a taxa de aplicação deve ser utilizada para cada tipo de solo em particular, sem que ocorra deflúvio superficial, fenômeno responsável pela erosão.

Segundo Bernardo (1996), para um mesmo tipo de solo, a velocidade de infiltração varia com a sua umidade no momento da aplicação, sua porosidade e a existência de camada compactada. Ainda segundo o mesmo autor, tomando-se como parâmetro a velocidade de infiltração básica (VIB) de um solo, pode-se classificá-lo em:

Solo de VIB muito alta	$> 3,0 \text{ cm h}^{-1}$
Solo de VIB alta	$1,5 \text{ a } 3,0 \text{ cm h}^{-1}$
Solo de VIB média	$0,5 \text{ a } 1,5 \text{ cm h}^{-1}$
Solo de VIB baixa	$< 0,5 \text{ cm h}^{-1}$

2.3.5.4 Movimento da água no contorno inferior (drenagem profunda)

Em condições de campo, uma das maiores dificuldades encontradas é a determinação da drenagem profunda, mediante a equação de Darcy-Buckingham (Oliveira, 2003). A componente drenagem profunda tem um valor muito significativo na determinação da evapotranspiração total das culturas agrícolas, podendo, a quantidade de drenagem que ocorre, às vezes, atingir proporções que alterarão sobremaneira o valor determinado (Guandique, 1993).

2.3.5.5 Coeficiente de cultura (Kc)

O coeficiente de cultura (K_c), proposto por Van Wijk e Vries, é adimensional e representa a razão entre a evapotranspiração da cultura, ET_c e a evapotranspiração de referência, ET_o (Sediyama et al., 1998).

A distribuição temporal do K_c para cada cultura irrigada constitui a curva da cultura. As curvas de cultura são corretamente obtidas de forma experimental e representam o efeito integrado da mudança na área da folha, da altura da planta, do grau de cobertura e da resistência do dossel da planta sobre a ET_c (Oliveira, 2003).

Encarnação (1980) comparou os valores do coeficiente K_c para o feijoeiro, obtidos pelos métodos do tanque Classe A, de Penman, da radiação solar e de Linacre, com os propostos por Doorenbos & Kassam (1979). O autor concluiu que o método do tanque Classe A foi o único que mostrou valores de K_c que não diferiram, significativamente, dos propostos.

Pavani (1985) obteve, para a cultura do feijão, valores decendiais de K_c sempre superiores aos constantes na tabela da FAO, no período entre o 3º e o 9º decêndio da cultura.

2.4 Análise econômica (função de produção)

Dos fatores de produção, a água e os fertilizantes são aqueles que limitam os rendimentos com maior frequência. Desse modo, o controle da irrigação e da fertilidade do solo constitui critério preponderante para o êxito da agricultura. A utilização das funções de produção permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes na agricultura ou na previsão de rendimentos culturais (Frizzone, 1986).

Oliveira (1993) mencionou que muitos trabalhos de pesquisa envolvendo irrigação e fertilizantes apontam recomendações genéricas que objetivam a obtenção de produtividades físicas máximas, sem qualquer preocupação com a economicidade. A utilização da irrigação, com base nessas informações, poderá torná-la inviável, do ponto de vista econômico, já que o ótimo econômico, geralmente, não corresponde à máxima produtividade biológica.

Define-se uma função de produção como sendo as relações técnicas entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produção física possível de se obter com a tecnologia existente (Ferguson, 1988).

Frizzone et al. (1987) mencionam que as variáveis da função de produção água-cultura podem ser expressas de diferentes maneiras. A variável independente água pode ser representada pela transpiração, evapotranspiração e lâmina de água aplicada durante o ciclo, entre outras. Ao usuário da irrigação é mais interessante utilizar como variável independente a lâmina de água aplicada à parcela, mesmo que apenas parte dela seja usada no processo de evapotranspiração. Em geral, a variável dependente refere-se à produtividade agrícola comercial de grãos, frutos, matéria verde ou seca, entre outras. Por fim, as funções de produção água-cultura são particularmente importantes para as

análises de produção agrícola quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, essas funções constituem o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e, relativamente à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para a produção econômica, com base na água disponível.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em área experimental do campus II do Centro Universitário de Patos de Minas (Unipam), no município de Patos de Minas, MG, localizado a 18°33'54'' de latitude Sul e 46°28'44'' de longitude Oeste, a uma altitude média de 835 m, durante o período de julho a outubro de 2005. A precipitação média anual é de 1.474,4 mm e temperatura média anual de 21,1 °C (CPA/Unicamp, 2006).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico, cujas características físicas e químicas foram analisadas pelo Laboratório de Análise do Solo, do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. Os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

TABELA 3. Resultados da análise física do solo da área experimental. Patos de Minas, MG, 2005.

Camada (cm)	Areia	Silte (%)	Argila	Classe textural
0-20	27	45	28	Média
20-40	28	42	30	Média

TABELA 4. Resultados da análise química do solo (0-20 cm profundidade) da área experimental. Patos de Minas, MG, 2005.

Características	Valores	Características	Valores
pH em água	5,9	V (%)	54,0
P (mg dm ⁻³)	51,1	m (%)	5,0
K (mg dm ⁻³)	87,0	M.O. (dag kg ⁻¹)	3,6
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	2,6	P-rem (mg L ⁻¹)	12,2
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,4	Zn (mg dm ⁻³)	11,4
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,2	Fe (mg dm ⁻³)	66,9
H + Al (cmolc dm ⁻³)	3,6	Mn (mg dm ⁻³)	41,4
SB (cmolc dm ⁻³)	4,2	Cu (mg dm ⁻³)	9,2
t (cmolc dm ⁻³)	4,4	B (mg dm ⁻³)	0,2
T (cmolc dm ⁻³)	7,8	S (mg dm ⁻³)	3,3

Análises realizadas no laboratório do Departamento de Ciências do Solo da UFLA. t=C.T.C. efetiva; T=C.T.C. a pH 7,0; m=saturação por alumínio; V=saturação por bases; SB=soma de bases trocáveis; P-rem=fósforo remanescente.

As equações de ajuste das curvas características de retenção de água no solo para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade, segundo modelo de Van Genuchten (1980), foram obtidas de acordo com Dourado Neto et al. (1995) e encontram-se na Tabela 5. Com o auxílio do software SWRC versão 3.0 (Soil Water Retention Curve), foram obtidos os parâmetros de ajuste das equações. A obtenção da curva de água no solo foi realizada em amostras deformadas no Laboratório de Relação Solo-Planta, do Departamento de Engenharia da UFLA, em Lavras, MG. Para as tensões de 2 kPa, 4 kPa, 6 kPa, 8 kPa e 10 kPa foi utilizado o método do funil de placa porosa (Funil de Hainess), e para as tensões de 33 kPa, 100 kPa, 500 kPa e 1500 kPa, a câmara de pressão de Richards.

A densidade média do solo para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, obtida pelo método do cilindro de Uhlund, forneceu valores de 1,0 g cm⁻¹ e 1,01 g cm⁻¹, respectivamente.

TABELA 5. Resultados da caracterização hídrica do solo da área experimental.
Patos de Minas, MG, 2005.

Camada (cm)	Equação (Van Genuchten)	R ²
0 - 20	$\theta = \frac{0,305}{\left[1 + (0,320 * \psi_m)^{1,56}\right]^{0,43}} + 0,215$	0,925
20 - 40	$\theta = \frac{0,375}{\left[1 + (0,985 * \psi_m)^{6,917}\right]^{0,127}} + 0,238$	0,958

θ =umidade volumétrica (cm³ cm⁻³); ψ_m =potencial matricial (kPa)

3.2 Cultivar

A cultivar empregada foi a BRS-MG-Talismã, que apresenta grãos tipo carioca, crescimento indeterminado com guias longas (tipo III), porte prostrado, ciclo médio de 85 dias, resistência à raça alfa Brasil de antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) e ao mosaico-comum (VMCF) e resistência intermediária à mancha-angular (*Phaeoisariopsis griseola*) (Cultivar, 2002).

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições, sendo empregado um esquema fatorial 5 x 3, constituído por cinco níveis de reposição de água no solo (40%, 70%, 100%, 130% e 160% da lâmina necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, diariamente) e três épocas de suspensão da irrigação (0, 7 e 14 dias após R9, ou seja, R9, R9+7 e R9+14).

Cada parcela experimental foi constituída por cinco linhas de semeadura com 3 m de comprimento espaçadas de 0,45 m e com densidade de 12 plantas por metro. Como útil foi considerada uma área central de 3 m², sempre

demarcada por um “gabarito” de madeira. Na Figura 1 é mostrada uma vista geral do experimento.



FIGURA 1. Vista geral da área experimental. Patos de Minas, MG, 2005.

3.4 Dados climáticos

Foi instalado um termohigrômetro para medidas diárias de umidade e temperatura (máxima e mínima), além de um pluviômetro (precipitação), um anemômetro (velocidade do vento) e um tanque classe A (evaporação). As leituras de temperatura, umidade, evaporação e precipitação foram realizadas diariamente, todas as manhãs. A velocidade média do vento foi obtida a partir de quatro leituras diárias.

3.5 Instalação e condução do experimento

Antes do preparo do solo, procedeu-se à aplicação de calcário com base no resultado de análise química do solo, tomando-se o valor de saturação por bases de 60%. Em seguida, foi realizada uma subsolagem, uma aração e duas gradagens, deixando a área preparada para a semeadura. A semeadura foi realizada no dia 8 de julho de 2005, à profundidade de, aproximadamente, 3 cm acima e ao lado do fertilizante de plantio, com 17 sementes por metro.

Após a emergência e estabelecimento das plantas, foi realizado um desbaste, ajustando-se o número de 12 plantas por metro.

As doses totais de nutrientes NPK seguiram recomendação da Chagas et al. (1999) para o nível tecnológico NT₄, sendo as coberturas com nitrogênio (30 kg ha⁻¹) e potássio (5 kg ha⁻¹) realizadas aos 25 e 40 dias após semeadura (DAS). Foram, ainda, realizadas pulverizações foliares com boro (CaB₂®) e manganês (Terrena-Mangan®) durante a florada da cultura. O zinco (2 kg ha⁻¹) foi aplicado no plantio juntamente com o fósforo e parte do nitrogênio e potássio.

Foi realizado, antes da semeadura, o tratamento das sementes com fungicida à base de fludioxonil (2 mL kg⁻¹). O controle fitossanitário foi realizado preventivamente aos 20 e 40 dias após emergência, buscando o controle das principais doenças e pragas na região: antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*), mancha-angular (*Phaeoisariopsis griseola*), mosca branca (*Bemisia tabaci*) e vaquinha (*Diabrotica speciosa*). Os produtos utilizados foram o fungicida azoxystrobin (80 g ha⁻¹) e o inseticida imidacloprido (150 g ha⁻¹). Foram realizadas três capinas manuais, aos 18, 33 e 45 dias, após semeadura.

3.6 Sistema e manejo da irrigação

Em cada parcela, foram utilizados quatro microaspersores com sobreposição de 50%, da marca DAN 2001, autocompensantes, com vazão de 28

L h⁻¹. O bombeamento foi realizado com um conjunto motobomba de 1,5 cv, a partir de uma caixa com capacidade para 5.000 litros. Foram colocados 15 registros, sendo uma saída para cada tratamento, e linhas de polietileno de 16 mm e 13 mm que fizeram, junto às conexões, a ligação com os microaspersores.

Em três parcelas do tratamento 100% c.c e R9+14 foram instaladas baterias de tensiômetros com o objetivo de controle da lâmina de irrigação. Cada bateria consistiu de dois tensiômetros, a 0,10 e 0,30 m de profundidade.

A capacidade de campo média do solo, conforme metodologia de Bernardo (1996), foi de 34,59% (10 kPa) e 29,31% (9 kPa), respectivamente, para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm.

O cálculo do tempo de irrigação foi realizado com base nos sensores de 0,10 e 0,30 m. As leituras, fornecidas em bar pelo tensímetro de punção foram transformadas em kPa e ajustadas por meio da Equação 1.

$$\Psi=L+0,098.h \quad (1)$$

em que:

Ψ = potencial matricial (kPa);

L = leitura do tensímetro transformada em kPa;

h = altura desde o ponto da leitura no tensiômetro até o centro da cápsula porosa (cm).

Com as tensões observadas, foram calculadas as umidades correspondentes, a partir das curvas características a 0,10 e 0,30 m (Tabela 5). De posse dessas umidades e daquela correspondente à capacidade de campo e, ainda, considerando a profundidade do sistema radicular estratificada em duas subcamadas (0-20 cm e 20-40 cm), foram calculadas as lâminas de reposição (Equações 2, 3 e 4).

$$LL=(\theta_{cc}-\theta_{atual})*z \quad (2)$$

$$LB = LL/Ea \quad (3)$$

$$LB_{\text{m\u00e9dia}} = LB_{\text{m\u00e9dia10cm}} + LB_{\text{m\u00e9dia30cm}} \quad (4)$$

em que:

LL = lâmina líquida de irrigação em cada subcamada (mm);

θ_{cc} = umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

θ_{atual} = umidade no momento de irrigar ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

z = profundidade do sistema radicular (mm);

LB = lâmina bruta de irrigação (mm);

Ea = eficiência de aplicação do sistema (0,9);

$LB_{\text{m\u00e9dia10cm}}$ = lâmina obtida pela média das leituras dos sensores instalados a 0,10 m;

$LB_{\text{m\u00e9dia30cm}}$ = lâmina obtida pela média das leituras dos sensores instalados a 0,30 m.

Outras três baterias de tensiômetros foram instaladas em cada um dos demais 14 tratamentos, com intuito de acompanhar a tensão de água no solo, no decorrer do experimento.

Foram realizados testes para a determinação do coeficiente de uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação. A uniformidade média observada no sistema foi de 98,5%, com emprego da Equação 5 recomendada por Merriam & Keller (1978), citados por Cabello (1996).

$$CU = \frac{q_{25}}{q_a} \quad (5)$$

em que:

CU = coeficiente de uniformidade de distribuição;

q_{25} = média das 25% menores vazões coletadas (L h^{-1});

q_a = média das vazões coletadas (L h^{-1}).

A lâmina de reposição observada no tratamento 100% c.c. e R9+14 serviu de base para elevar a umidade do solo à capacidade de campo e, a partir desse valor, houve acréscimo ou decréscimo para os demais tratamentos. A aplicação dos diferentes níveis de reposição foi iniciada aos 18 DAS.

3.7 Características avaliadas

3.7.1 Produtividade da cultura

Após colheita, os grãos foram pesados e tiveram seu grau de umidade medido, para correção do peso para umidade de 13%, conforme Equação 6 (Carvalho, 2005). O peso dos grãos foi expresso em kg ha⁻¹. Todas as parcelas foram colhidas no momento que o tratamento padrão 100% c.c. e R9+14 atingiu o ponto de arranquio. A colheita foi realizada manualmente e a determinação da umidade em medidor padrão no Laboratório de Sementes da FACIAGRA/Unipam, Patos de Minas, MG.

$$P = \frac{Pc.(100 - Uo)}{(100 - Ui)} \quad (6)$$

em que:

P= peso corrigido (kg ha⁻¹);

Pc = peso de campo (kg ha⁻¹);

Uo= umidade medida após colheita (%);

Ui= umidade de correção (13%).

3.7.2 Número e peso de grãos não colhidos

Em função das diferentes lâminas de água aplicadas no experimento e da conseqüente diferença de maturação, realizou-se a coleta das vagens e grãos que se encontravam sobre o solo. Os grãos foram contados e pesados, visando dimensionar as perdas ocorridas. Os valores foram expressos em número e peso de grãos por m².

3.7.3 Número de vagens verdes

Também com a finalidade de avaliar o grau de maturação por ocasião da colheita, foram contadas as vagens que ainda se encontravam verdes. O resultado foi expresso em número de vagens verdes por m².

3.7.4 Peso de 100 grãos

O peso médio de 100 grãos foi determinado a partir da pesagem de três amostras de 100 grãos retiradas do total produzido na parcela útil. O peso obtido também foi corrigido para 13% de umidade, por meio da Equação 6.

3.7.5 Número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem

Durante a colheita, em cada parcela, foram amostradas três plantas para a determinação dos números médios de grão por planta, vagens por planta e grãos por vagem.

3.7.6 Diâmetro do colo das plantas

Aos 45, 60 e 75 DAS foi medido o diâmetro do colo, a 2 cm da superfície, de três plantas de cada parcela experimental, com o auxílio de um paquímetro digital. Esta característica foi avaliada apenas em função das lâminas de reposição de água no solo.

3.7.7 Massa seca das plantas

Nos estágios R5, R7 e R9, foram amostradas três plantas por parcela e colocadas em estufa (circulação de ar), a 65°C, por 48 horas e, posteriormente, pesadas. A massa seca das plantas também foi avaliada apenas em função da lâmina de água.

3.7.8 Eficiência do uso da água

Por meio da relação entre a produtividade média de cada parcela e a lâmina aplicada durante o ciclo, foi obtida a eficiência do uso da água.

3.8 Coeficiente de cultura

O coeficiente de cultura K_c foi determinado pela Equação 7.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (7)$$

em que:

ET_c = evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹);

ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

3.8.1 Balanço hídrico do solo

O balanço de água no solo foi realizado nas parcelas do tratamento 100% c.c. e R9+14, em que obtiveram-se os dados da equação e, posteriormente, os valores do coeficiente de cultura (Kc).

3.8.1.1 Precipitação e lâminas aplicadas

Os dados de precipitação foram obtidos por meio de um pluviômetro de 150 mm de diâmetro instalado no centro da área experimental. Os dados de irrigação foram conhecidos por meio das Equações 2, 3 e 4.

3.8.1.2 Deflúvio superficial (E)

Para o cálculo do deflúvio superficial (E), foram confrontadas as lâminas precipitadas com a lâmina infiltrada potencial, fornecida pela equação de infiltração acumulada do solo, a qual foi estimada com dados obtidos pelo método do infiltrômetro de anel, com base no modelo do tipo potencial (Equação 8):

$$I = aT^n \quad (8)$$

em que:

I = infiltração acumulada (L);

a= parâmetro do solo, dependente da condição inicial de umidade (L T⁻ⁿ);

T = tempo de infiltração (T);

n = parâmetro característico do solo, adimensional e constante, cujo valor pode situar-se entre 0 e 1.

3.8.1.3 Movimento de água no contorno inferior (Q)

O movimento de água no contorno inferior foi determinado pela Equação de Darcy-Buckingham (9):

$$q = -K(\theta) \frac{d\psi_t}{dx} \quad (9)$$

em que:

q = densidade de fluxo da água no solo (mm h^{-1});

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica do solo (mm h^{-1});

$\frac{d\psi_t}{dx}$ = gradiente de potencial total (mm mm^{-1}).

A condutividade hidráulica do solo não saturado foi determinada pelo método de Mualem (1976), conforme a equação 10.

$$K(\theta) = K_0 w^L \left[1 - \left(1 - w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (10)$$

em que:

$$w = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

em que:

w = saturação relativa;

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado;

L = parâmetro empírico, que foi estimado por Mualem (1976) como sendo, aproximadamente 0,5, para a maioria dos solos (Libardi, 1999);

θ = umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r = umidade residual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s = umidade de saturação do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Para a obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), foi utilizado o Permeâmetro de Guelph.

3.8.1.4 Variação do armazenamento de água no solo

A variação do armazenamento foi calculada com base na Equação 11, considerando-se a profundidade igual a 0,4 m.

$$\Delta h = (\theta_2 - \theta_1) \cdot z \quad (11)$$

em que:

Δh = variação de armazenamento no intervalo de tempo considerado (mm);

θ_2 = umidade média no tempo final ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

θ_1 = umidade média no tempo inicial ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

z = profundidade considerada para o balanço (400 mm).

3.8.1.5 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência foi determinada pelo método do tanque Classe A (Equação 12):

$$E_{To} = K_t \cdot E_V \quad (12)$$

em que:

K_t = coeficiente do tanque (Tabela 2, conforme Doorenbos & Kassam, 1994);

E_V = evaporação do tanque (mm dia^{-1}).

3.8.1.6 Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cultura foi obtida promovendo-se o balanço hídrico num volume de controle correspondente à profundidade de 0,4 m.

$$\Delta h = P + I \pm Q - ETc - E \quad (13)$$

em que:

Δh = variação do armazenamento (mm);

P = lâmina precipitada (mm);

I = irrigação (mm);

Q = lâmina que entra ou sai do contorno inferior (mm);

ETc = evapotranspiração (mm);

E = deflúvio superficial (mm).

3.9 Análises estatísticas

Todas as características foram submetidas à análise de variância, sendo os efeitos dos tratamentos estudados por meio de análise de regressão ou do teste de média Scott-Knott, conforme o caso. A ferramenta utilizada para as análises foi o software Sisvar for Windows, versão 4.3 (Ferreira, 1999).

3.10 Eficiência econômica da lâmina de água (função de produção)

O modelo utilizado para o ajuste da função de produção foi um polinômio do segundo grau, conforme Equação 14:

$$y = f(w) = a + b.w + cw \quad (14)$$

em que:

y = produtividade (kg ha^{-1});

w = lâmina total de água aplicada (mm);

a, b e c = parâmetros da equação.

Para a abordagem econômica da irrigação em um determinado sistema de produção, Peri et al. (1979), citados por Frizzone (1986), introduziram o conceito de lâmina ótima econômica, correspondente à máxima receita líquida obtida. O lucro foi expresso pela Equação 15.

$$L(W) = P_y \cdot Y - P_w \cdot W - C \quad (15)$$

em que:

$L(W)$ = lucro ($\text{R\$ ha}^{-1}$);

P_y = preço do feijão ($\text{R\$ kg}^{-1}$);

P_w = preço do fator água ($\text{R\$ mm}^{-1}$);

W = lâmina total de água aplicada (mm);

Y = produtividade do feijão (kg ha^{-1});

C = custo dos fatores mantidos constantes no experimento.

P_y representou o preço médio ($\text{R\$ 1,40 kg}^{-1}$) do feijão no mês de outubro de 2006, no comércio do Alto Paranaíba, microrregião do estado de Minas Gerais, onde localiza-se o município de Patos de Minas, MG.

P_w representou o custo do volume unitário de água, acrescido do custo de energia utilizada no bombeamento, da depreciação do sistema de irrigação e dos custos de operação e manutenção deste sistema, conforme menciona Pereira (2005).

Para a composição do custo da irrigação a ser empregado na análise econômica, tomou-se por base o sistema de pivô central por expressar a realidade dos produtores da região, com especificações constantes da Tabela 6.

TABELA 6. Características do sistema pivô central utilizado nos cálculos dos custos da energia.

ITEM	DESCRIÇÃO
Marca	VALLEY
Modelo	4871-8000-VSL/8-1.007
Propulsão	Elétrica
Número de torres	8
Raio total irrigado	437,07 metros
Área circular irrigada	60,01 hectares
Altura livre entre torres	2,74 metros
Precipitação diária (lâmina bruta)	8,0 milímetros dia ⁻¹
Período (rele a 100%)	9,80 horas
Lâmina por percurso (a 100%)	3,73 milímetros
Composição	4 lances médio e 4 lances longos Com balanço de 20 m, com spray final, sem canhão final.
Aspersores	Super spray, com tubo de descida
Vazão total	228,61 metros cúbicos h ⁻¹
Comprimento até a última torre	411,69 metros
Pressão no final da tubulação	1,30 atmosferas
Perda de carga total	7,0986 mca
Altura manométrica total	71,92 mca
Vazão por área	3,81 metros cúbicos h ⁻¹ ha ⁻¹
Comprimento da tubulação	530 metros

Dados cedidos pela firma PIVOFORTE, Uberlândia, MG. Outubro, 2006.

O custo do sistema de irrigação com especificações da Tabela 6 foi de R\$ 250.000,00, sendo o custo por hectare de R\$ 4.165,97. O valor residual foi estimado em 20% do valor da aquisição, segundo Pereira (2005), o que equivale a R\$ 50.000,00.

A depreciação do sistema foi calculada conforme Equação 16:

$$Dp = \frac{(Vc - Vr)}{Vu} \quad (16)$$

em que:

Dp= depreciação do sistema (R\$);

Vc= valor de compra do sistema (R\$);

Vr= valor residual do sistema (R\$);

Vu= vida útil do sistema (anos).

Considerando que o equipamento será utilizado por dois ciclos em cada ano e a vida útil de 10 anos, a depreciação é de R\$ 166,63 por hectare por ciclo.

Brasil (1987) relata que a manutenção e a operação do sistema equivalem a 2% do valor de aquisição, o que representa R\$ 41,65 por hectare e ciclo de produção.

O custo da energia para bombeamento varia de acordo com a classe de consumidor e tipo de contrato. Consideraram-se no presente trabalho, a classe consumo rural e o grupo de tensão A, em função do motor utilizado pelo sistema de irrigação (rede trifásica de 380 V). Foram considerados a demanda de potência (kW) e o consumo de energia (kWh); adotou-se, para a análise a tarifa horo-sazonal, considerando o horário fora de ponta (HFP) e o horário fora de ponta/noturno (HFP/N), cujo valor representa 22% do valor cobrado pelo HFP (todos no período seco). O consumo de energia (C), a demanda de potência (D) e o custo final (CF) de energia (R\$) foram calculados com as Equações 17, 18 e 19, sugeridas por Carvalho & Reis (2000). A potência (P) é dada em cv.

$$C = 2,64 + 0,8.P \quad (17)$$

$$D = \frac{P.0,736}{\eta} \quad (18)$$

$$CF = \frac{(D_c.T_d) + (C_{fp}.T_{fp}.H_{fp}) + (C_{fpm}.T_{fpm}.H_{fpm})}{0,82} \quad (19)$$

em que:

η = rendimento, decimal;

D_c = demanda total contratada, kW;

T_d = tarifa de demanda, R\$ kW⁻¹;

C_{fp} = consumo de energia em horário fora de ponta, kWh;

T_{fp} = tarifa de consumo em horário fora de ponta, R\$ kWh⁻¹;

H_{fp} = horas utilizadas no horário fora de ponta, h;

C_{fpm} = consumo de energia em horário fora de ponta/noturno, kWh;

T_{fpm} = tarifa de consumo em horário fora de ponta/noturno, R\$ kWh⁻¹;

H_{fpm} = horas utilizadas no horário fora de ponta/noturno, h;

Para o cálculo da energia de bombeamento, utilizou-se a lâmina aplicada no tratamento 100% c.c. e R9+14. Considerou-se o pivô a 60% de velocidade no percentímetro a cada irrigação, com um total de 16,33 horas, sendo 6 horas de irrigação no HFP/N e 10,33 horas no HFP. A potência no eixo calculada foi de 92,68 cv e a comercial de 100 cv, com rendimentos de motor e bomba de 0,9 e 0,73, respectivamente. Os valores de tarifação para outubro de 2006 foram: demanda HFP de R\$ 10,2976 e consumo HFP período seco R\$ 0,24288 kW h⁻¹.

Substituindo-se todos os valores citados anteriormente nas Equações 17, 18 e 19, tem-se um custo de bombeamento de R\$ 308,63 por hectare e ciclo de cultivo.

Não foi considerado o custo para o volume de água utilizado, sendo a captação considerada pública ou de uso do produtor.

Os custos operacionais efetivos (variáveis) foram compostos apenas pela energia de bombeamento e manutenção. A margem bruta foi dada por MB= Py.Y-custo operacional efetivo (Pereira, 2005).

O custo do fator água (energia + manutenção) foi de R\$ 0,5456 por mm de lâmina aplicada.

Considerando que o lucro é máximo quando a primeira derivada do rendimento em relação à lâmina total de água for igual à relação entre fator e produto, tem-se:

$$\frac{\partial L(W)}{\partial W} = \frac{\partial Y}{\partial W} \cdot P_y - P_w = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = \frac{P_w}{P_y} \quad (21)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = b + 2cW = \frac{P_w}{P_y} \quad (22)$$

A lâmina ótima econômica foi obtida da Equação 22. Para a obtenção do custo de produção do feijão foram tomadas informações contidas em AGRIANUAL (2006), referentes a julho de 2005, com atualização dos preços para outubro de 2006, obtendo-se R\$ 2.920,78 ha⁻¹.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados climáticos

Os dados relativos às temperaturas registradas diariamente durante a condução do experimento são apresentados na Figura 2. Os valores médios de temperatura máxima e mínima observados foram de 30,9°C e 15,7°C, respectivamente. Para Vieira (2000), temperaturas maiores que 35°C favorecem moléstias e inviabilizam o grão de pólen. Nota-se, que poucas vezes, a temperatura máxima foi superior a esse valor durante a condução do experimento. Quanto às temperaturas mínimas, constatou-se que, nos primeiros 20 dias os valores ficaram próximos a 12°C, enquanto a temperatura média situou-se em torno de 21°C. Essa combinação favoreceu um desenvolvimento inicial lento, prolongando o ciclo da cultura por alguns dias nos tratamentos com maiores lâminas aplicadas.

A umidade máxima média observada durante a condução do experimento foi de 89,59% e a mínima média de 30,63%. A umidade relativa média foi de 58,61%. Os maiores problemas fitossanitários com a cultura ocorrem quando a umidade relativa é superior a 70% (Vieira, 2000), mas a umidade média diária poucas vezes superou esse valor (Figura 3).

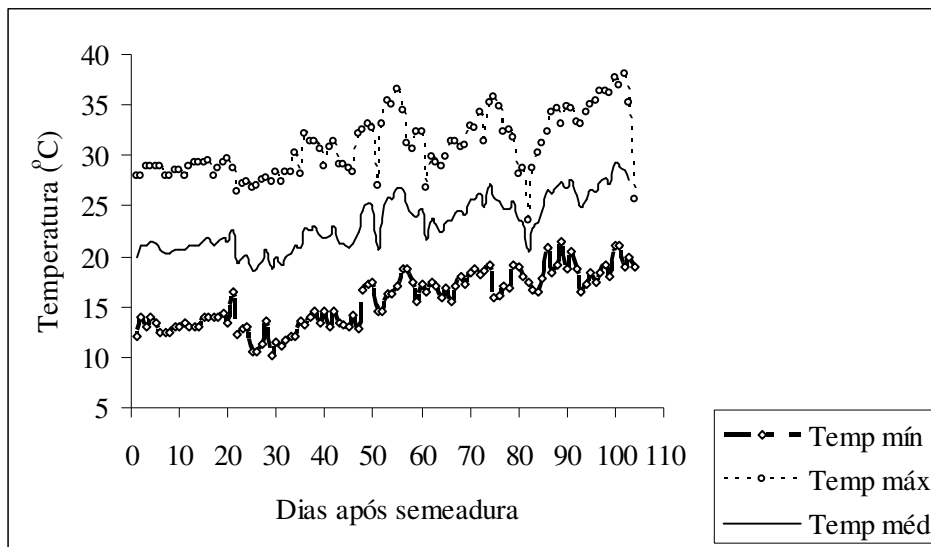


FIGURA 2. Representação gráfica das temperaturas diárias, durante a condução do experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

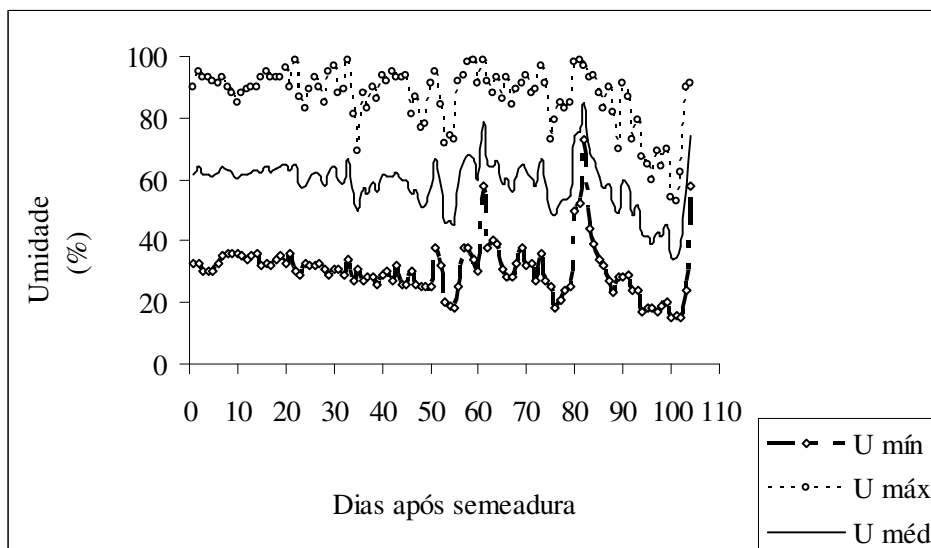


FIGURA 3. Representação gráfica das umidades diárias, durante a condução do experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

4.2 Produtividade da cultura

A análise de variância revelou efeito significativo das lâminas de reposição, das épocas de suspensão da irrigação e da interação entre esses fatores (Tabela 7). A julgar pelo valor do CV% (10,3), a precisão experimental foi muito boa, acima do normalmente obtido com esta característica na cultura do feijoeiro (Abreu et al., 1994).

TABELA 7. Resumo da análise de variância dos dados relativos à produtividade do feijoeiro (kg ha⁻¹). Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrado médio
Reposição de água (R)	4	397442,7**
Época suspensão irrigação (E)	2	473119,1**
R x E	8	335010,2**
Bloco	3	
Erro	42	
CV(%):	10,30	
Média geral (kg ha ⁻¹):	2.818	

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Felipe (1991), Frizzone (1986) e Garrido (1998) também encontraram diferença significativa entre lâminas de irrigação aplicadas na cultura do feijoeiro. Mantovani (1986), entretanto, não encontrou diferença estatística entre as lâminas aplicadas no intervalo de 292,02 e 410,85 mm.

Na Tabela 8 são apresentadas as lâminas de água aplicadas em cada tratamento. Os valores de lâmina correspondentes às reposições de 100% ou mais situaram-se acima da demanda hídrica apresentada por Doorenbos &

Kassam (1994), de 300 a 500 mm (intervalo obtido de diversos ensaios em diversos locais).

TABELA 8. Lâminas (mm) de água aplicadas em todos os tratamentos.

Reposição (%)	Épocas de suspensão da irrigação		
	R9	R9+7	R9+14
40	251,51	273,35	292,02
70	396,94	435,69	467,32
100	542,08	597,43	642,32
130	687,22	759,17	817,92
160	832,36	920,21	993,21

Nas Figuras 4, 5 e 6 é mostrado o comportamento da produtividade em função da reposição de água no solo, com o emprego de diferentes épocas de suspensão da irrigação: R9, R9 + 7 e R9 + 14 dias, respectivamente.

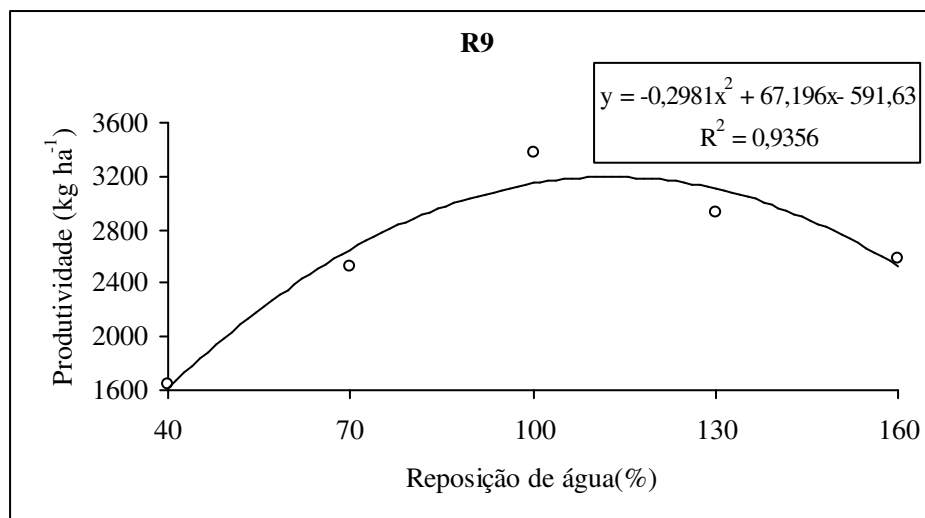


FIGURA 4. Produtividade média, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9.

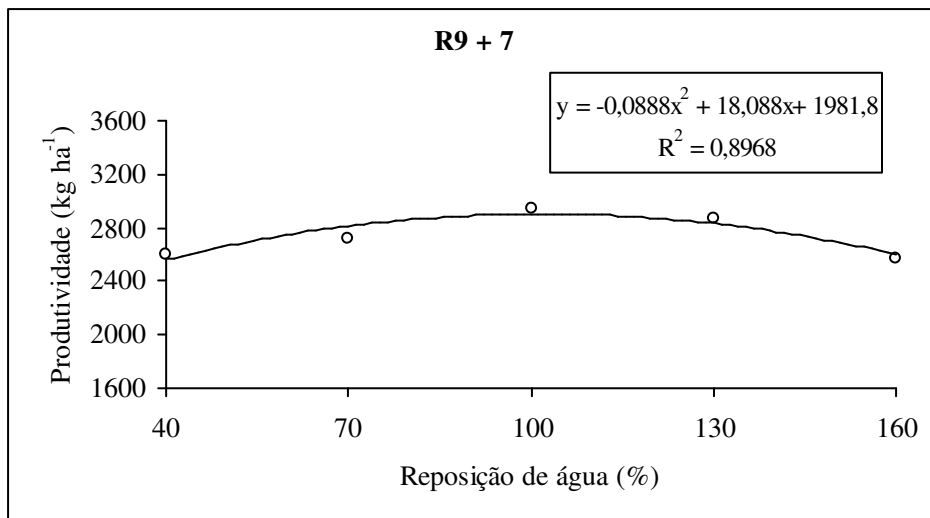


FIGURA 5. Produtividade média, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9 + 7.

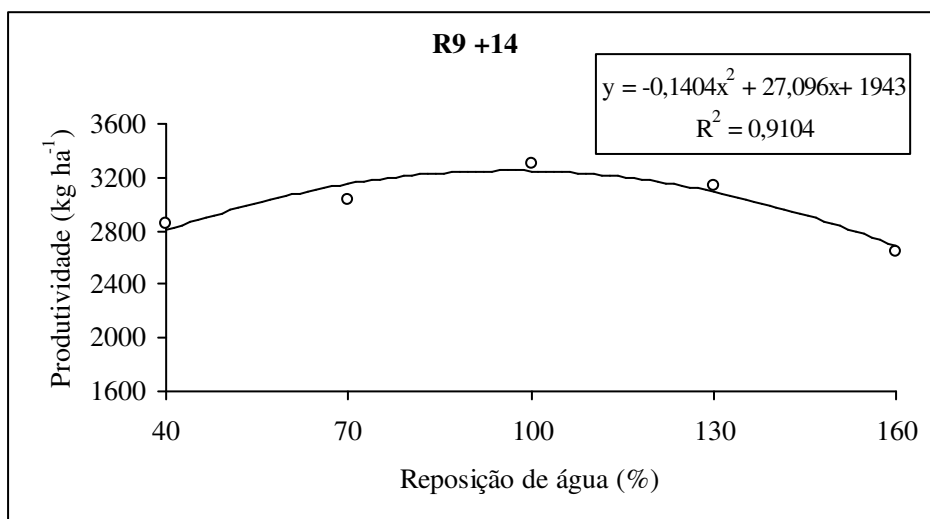


FIGURA 6. Produtividade média, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9 + 14.

Verifica-se que, independente da época de suspensão da irrigação, há um aumento da produção em função da reposição de água, atingindo um máximo com uma reposição de água próxima a 100%, havendo uma queda de produtividade após esse valor. Dessa forma, lâminas menores ou maiores ocasionaram perdas de produtividade, em relação à reposição de 100%. Para Guimarães (1988), o déficit hídrico ocasiona murchamento das plantas, prejudicando sua fisiologia, culminando em queda de produtividade; o feijão é uma planta muito sensível ao estresse hídrico, devido à sua baixa capacidade de recuperação após o déficit e ao seu sistema radicular pouco desenvolvido. Por outro lado, lâminas excessivas provocam um ambiente com falta de aeração para as plantas, bem como favorecem a disseminação de doenças e perdas de nutrientes por lixiviação. O feijoeiro é uma planta relativamente sensível ao excesso de água no solo, pois, nesta condição, o desenvolvimento vegetativo e o rendimento são prejudicados, devido ao aumento da resistência do movimento da água através das raízes, menor absorção de nutrientes, menor aeração e aumento da concentração de substâncias tóxicas nas plantas (Silveira & Stone, 2001). A redução do rendimento da cultura com reposições excessivas também foi verificada por Azevedo (1984), Carvalho (1992), Frizzone (1986) e Garrido (1998).

Para Silveira & Stone (2001), o rendimento do feijoeiro é bastante afetado pela condição hídrica do solo e deficiência ou excesso de água nas diferentes fases do ciclo da cultura causam redução na produtividade.

Stone & Moreira (2000), trabalhando com diferentes lâminas de irrigação, também observaram maior produção na cultura do feijoeiro com lâminas que elevaram o solo próximo à capacidade de campo, e queda da produtividade com aumento da lâmina de irrigação.

Do mesmo modo, Figueredo (1998), estudando o momento de proceder a irrigação com base na tensão de água no solo, concluiu que valores de tensões

próximos à capacidade de campo proporcionaram maiores rendimentos no feijoeiro.

Os dados médios de produtividade para cada época, dentro de cada nível de reposição de água, são apresentados na Tabela 9. A suspensão da irrigação em R9 resultou em menor produtividade em três das lâminas de reposição utilizadas, mas, na lâmina de 100% de reposição (a melhor delas), não houve diferenças significativas entre as épocas de suspensão da irrigação, indicando que, em termos de produtividade física, não se justifica continuar com a irrigação até muito próximo da colheita.

TABELA 9. Produtividade média (kg ha⁻¹) do feijoeiro comum para as diferentes reposições de água, em função das épocas de suspensão da irrigação.

Épocas	Reposição água (%)				
	40	70	100	130	160
R9	1645,8 b ¹	2521,2 b	3377,4 a	2928,0 b	2578,0 a
R9 + 7	2601,0 a	2724,6 a	2940,0 a	2870,4 b	2577,0 a
R9 + 14	2853,0 a	3033,6 a	3297,6 a	3144,6 a	2649,0 a

¹As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

4.3 Número e peso de grãos não colhidos

A análise de variância indicou efeito significativo dos fatores individualmente e da interação entre eles (Tabela 10). Observa-se, ainda, que, a julgar pelos valores de CV(%), a precisão experimental conseguida nas estimativas destas características foi menor que a da produtividade.

TABELA 10. Resumo da análise de variância dos dados relativos ao número e ao peso de grãos não colhidos (por m²) do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrados médios	
		Nº de grãos	Peso de grãos
Reposição de água (R)	4	53195,40**	4503,7**
Época suspensão irrigação (E)	2	25116,01**	1086,7**
R x E	8	3231,24**	500,28**
Bloco	3		
Erro	42		
CV(%):		36,73	35,34
Média geral:		103,95	29,23

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Verifica-se que houve uma queda linear no número de grãos não colhidos, em função do aumento da reposição de água (Figuras 7 e 8), suspendendo a irrigação nas etapas R9 ou R9+7. Quando interrompeu-se a irrigação em R9+14, também houve queda, embora quadrática, do número de grãos não colhidos (Figura 9). Plantas em ambientes mais secos, como proporcionado pela reposição de 40%, apresentaram um maior número de vagens deiscentes e atingiram a maturação mais rapidamente. Lopes (1986), por exemplo, observou, em Viçosa, MG, redução no ciclo do feijoeiro sob condições de déficit hídrico, enquanto Bergamaschi (1988) afirmou que o estresse por deficiência de água antecipa a maturação do feijoeiro.

Conforme pode ser observado nas Figuras 10, 11 e 12, lâminas maiores proporcionam menor número de vagens deiscentes, devido à maior vegetação das plantas. É nítida a diferença visual dos tratamentos com reposição de 40%,

com vagens mais secas, e os tratamentos com reposição de 100% e 160% (R9+14).

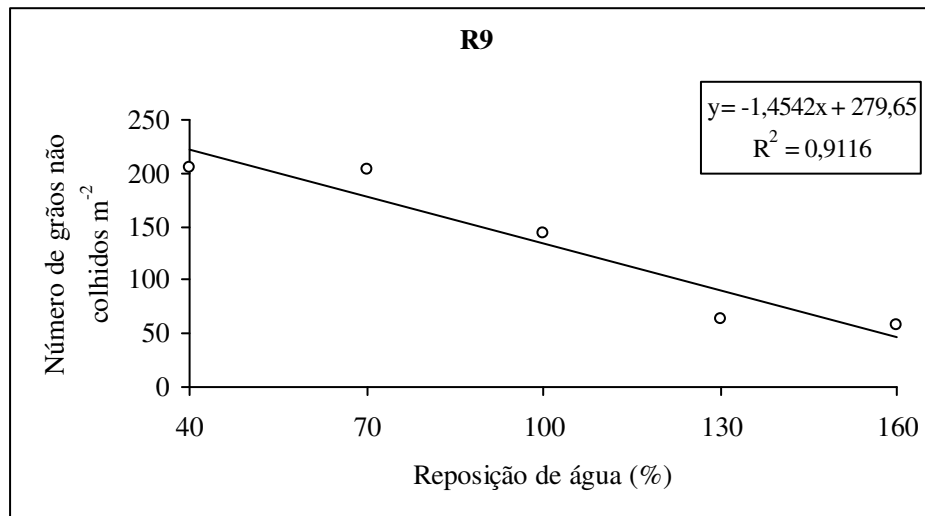


FIGURA 7. Número de grãos não colhidos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9.

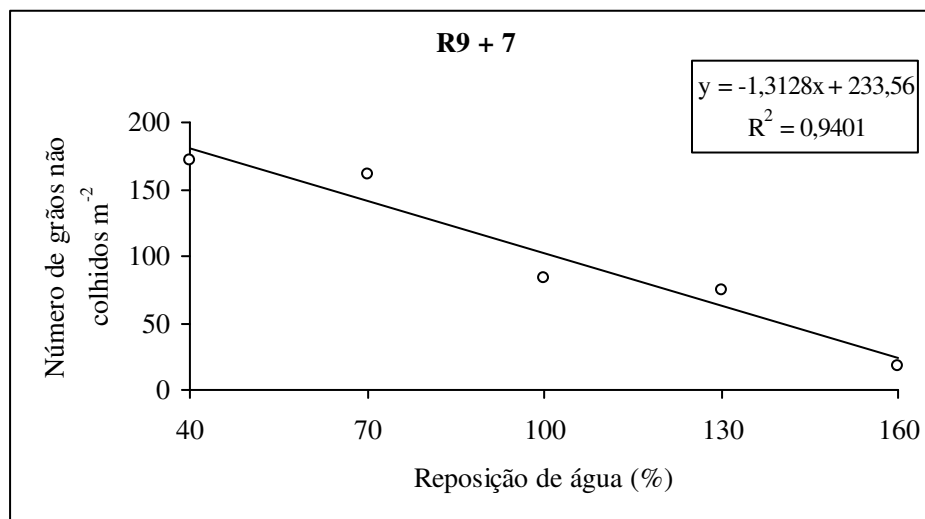


FIGURA 8. Número de grãos não colhidos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+7.

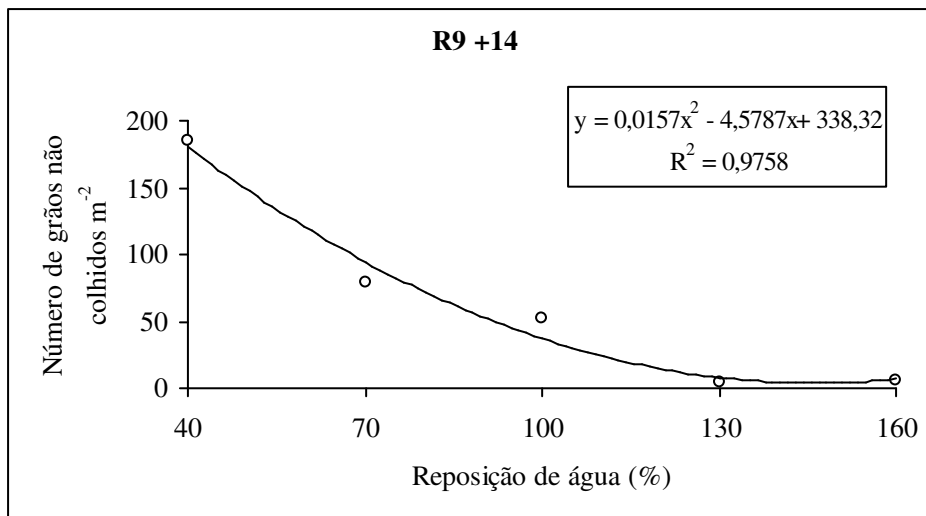


FIGURA 9. Número de grãos não colhidos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+14.



FIGURA 10. Vista geral da parcela da reposição 40%, no dia da colheita (R9+14). Patos de Minas, MG, 2005.



FIGURA 11. Vista geral da parcela da reposição 100%, no dia da colheita (R9+14). Patos de Minas, MG, 2005.



FIGURA 12. Vista geral da parcela da reposição 160%, no dia da colheita (R9+14). Patos de Minas, MG, 2005.

Quando se suspendeu a irrigação em R9, as plantas atingiram maturação final mais rápida, o que acarretou aumento do número de grãos não colhidos, independente da lâmina de reposição. Esse aumento foi significativo, principalmente em relação à época R9+14 (Tabela 11).

TABELA 11. Número de grãos não colhidos por m², em função de diferentes reposições de água e épocas de suspensão da irrigação.

Épocas	Reposição água (%)				
	40	70	100	130	160
R9	205,22 a ¹	202,98 a	142,91 a	65,58 a	57,15 a
R9 + 7	171,91 a	161,83 a	84,25 b	75,00 a	18,41 b
R9 + 14	185,75 a	78,55 b	52,32 b	3,83 b	6,50 b

¹As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Nas Figuras 13, 14 e 15 é mostrado o comportamento do peso de grãos não colhidos por m², em função da reposição de água. De modo semelhante ao verificado para o número de grãos, houve queda da variável, com o aumento da reposição de água no solo. O efeito das épocas sobre o peso de grãos, como foi esperado, também seguiu o mesmo padrão observado para o número de grãos (Tabela 12). De maneira geral, portanto, o aumento da lâmina de água reduziu gradativamente as perdas, mas esse efeito não teve reflexo sobre a produtividade, pois esta decresceu após 100% de reposição. O efeito da época de suspensão da irrigação foi menos consistente, variando em função da lâmina, mas também parece não ter influenciado proporcionalmente o rendimento dos grãos.

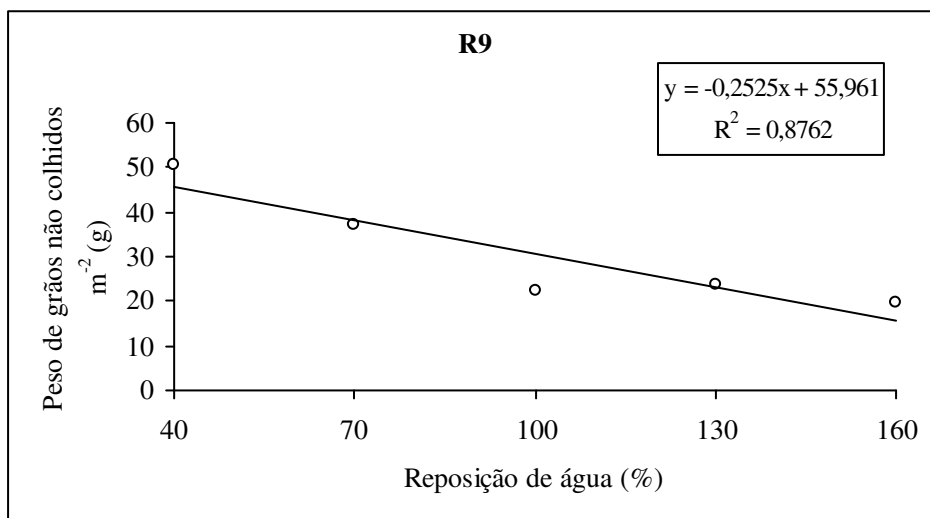


FIGURA 13. Peso de grãos não colhidos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9.

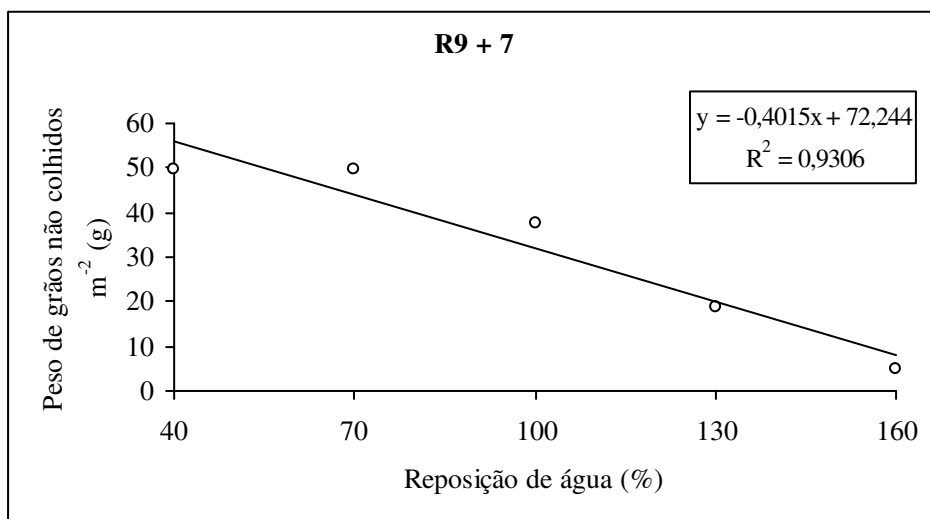


FIGURA 14. Peso de grãos não colhidos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+7.

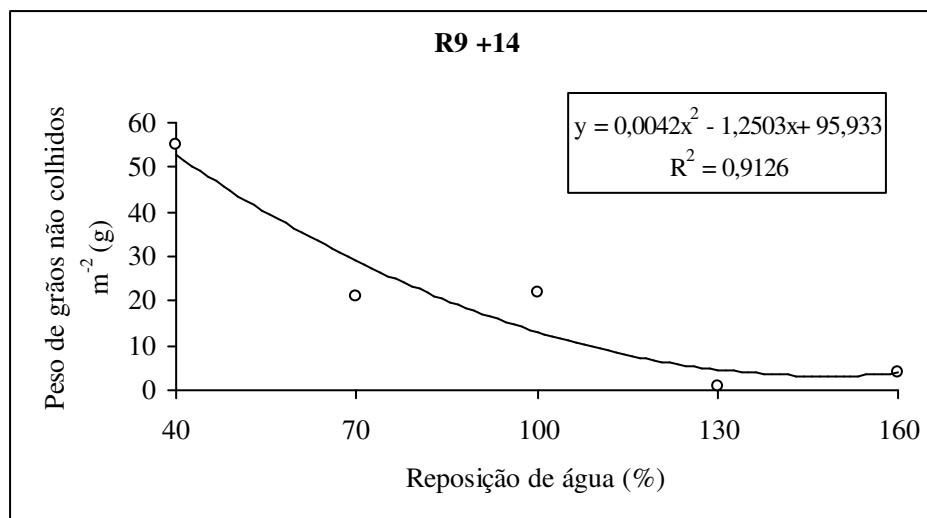


FIGURA 15. Peso de grãos não colhidos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+14.

TABELA 12. Peso de grãos não colhidos, em gramas m⁻², do feijoeiro, para as diferentes reposições de água, em função das épocas de suspensão da irrigação.

Épocas	Reposição água (%)				
	40	70	100	130	160
R9	50,79 a ¹	37,08 a	22,33 b	23,82 a	19,55 a
R9 + 7	49,83 a	49,50 a	37,41 a	18,75 a	4,98 b
R9 + 14	55,25 a	20,98 b	21,83 b	1,04 b	4,15 b

¹As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

4.4 Número de vagens verdes

A análise de variância revelou efeito significativo das lâminas de reposição e das épocas de suspensão da irrigação, mas não houve significância da interação entre os dois fatores (Tabela 13).

TABELA 13. Resumo da análise de variância dos dados relativos ao número de vagens verdes (por m²) do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrado médio
Reposição de água (R)	4	274,867**
Época suspensão irrigação (E)	2	119,690**
R x E	8	34,250 ^{NS}
Bloco	3	
Erro	42	
CV(%):	36,74	
Média geral :	6,08	

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. ^{NS} não significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Verifica-se que, com o aumento do nível de reposição de água no solo, houve acréscimo do número de vagens verdes por m², coletadas no dia da colheita (Figura 16). Com o aumento das lâminas de água no solo, houve, possivelmente, um estímulo à vegetação das plantas, culminando em maiores valores de vagens verdes. Do mesmo modo, como nos tratamentos cuja época de suspensão da irrigação foi em R9+14, as irrigações foram mantidas até o final do ciclo, também foram maiores os valores médios de vagens verdes por m² (Tabela 14). O número de vagens verdes praticamente dobrou quando se estendeu o fim da irrigação de R9 para R9+14, e esse efeito pode ter afetado a produtividade, embora com intensidade diferente. O maior número de vagens

verdes pode significar maior período de enchimento de grãos, favorecendo a produtividade.

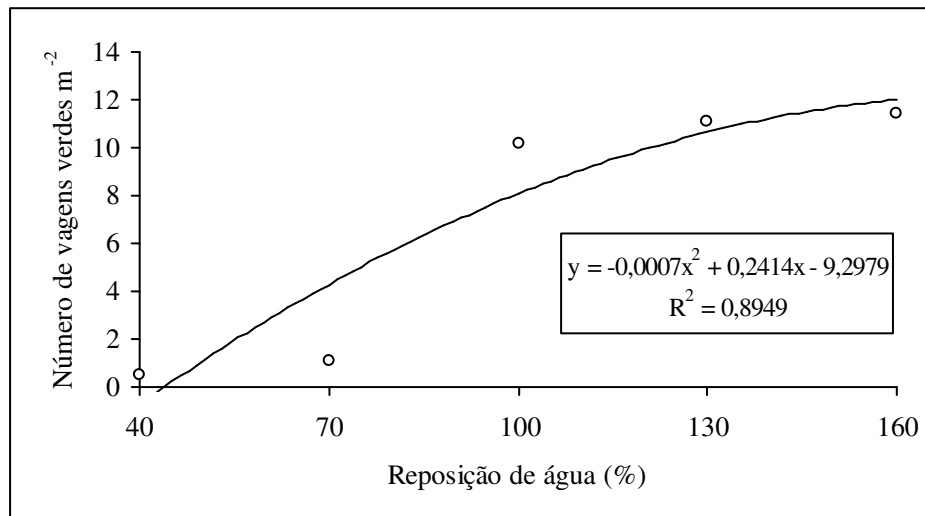


FIGURA 16. Número de vagens verdes, em função da reposição de água.

TABELA 14. Número de vagens verdes, por m², em função das épocas de suspensão da irrigação.

Épocas	Número de vagens m ⁻²
R9	4,08 b
R9 + 7	5,35 b
R9 + 14	8,81 a

As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

4.5 Peso de 100 grãos

A análise de variância revelou efeito significativo não apenas do nível de reposição de água, mas também das épocas de suspensão da irrigação e da interação entre os fatores (Tabela 15).

TABELA 15. Resumo da análise de variância dos dados relativos ao peso de 100 grãos do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrado médio
Reposição de água (R)	4	4,37**
Época suspensão irrigação (E)	2	1,62*
R x E	8	1,63**
Bloco	3	
Erro	42	
CV(%):	2,55	
Média geral (g) :	25,89	

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. * significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Nas Figuras 17, 18 e 19 é apresentado o comportamento do peso de 100 grãos, em função das reposições de água no solo para cada época de suspensão da irrigação. Nota-se que, com lâminas abaixo e acima de 100% de reposição, o peso de 100 grãos é menor, decrescendo à medida que se intensifica o déficit ou excesso de aplicação de água. Resultados semelhantes foram relatados por diferentes autores. Felipe (1991), trabalhando em Lavras, MG, com diferentes lâminas de água, aplicadas à cultivar Carioca, observou que o peso de 100 grãos foi afetado significativamente pelas lâminas de água, com queda da variável em função da redução da lâmina. Carvalho (1992) encontrou resposta quadrática do peso de 100 grãos, em função da aplicação de diferentes lâminas na cultura do feijoeiro.

As equações obtidas para esta característica (Figuras 17, 18 e 19) parecem indicar que ela teve papel importante na definição da produtividade de grãos (Figuras 4, 5 e 6). Maiores lâminas, portanto, poderiam ter sido responsáveis pela formação de grãos maiores e mais pesados. As diferenças observadas, entretanto, foram de pequena magnitude (Figuras 17, 18 e 19).

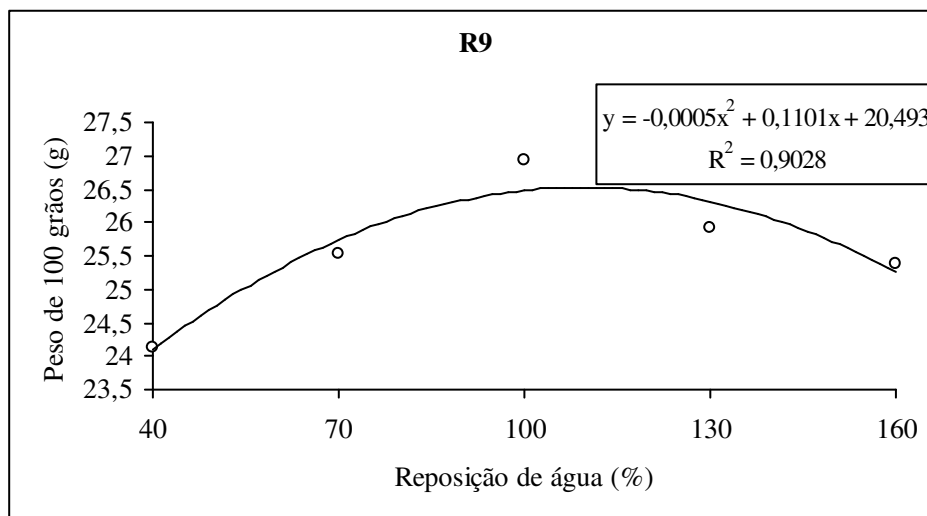


FIGURA 17. Peso de 100 grãos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9.

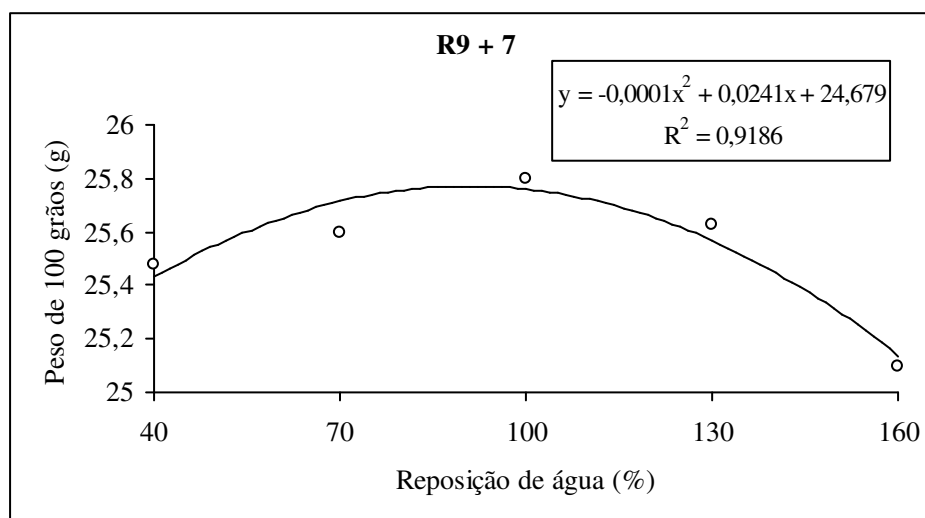


FIGURA 18. Peso de 100 grãos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+7.

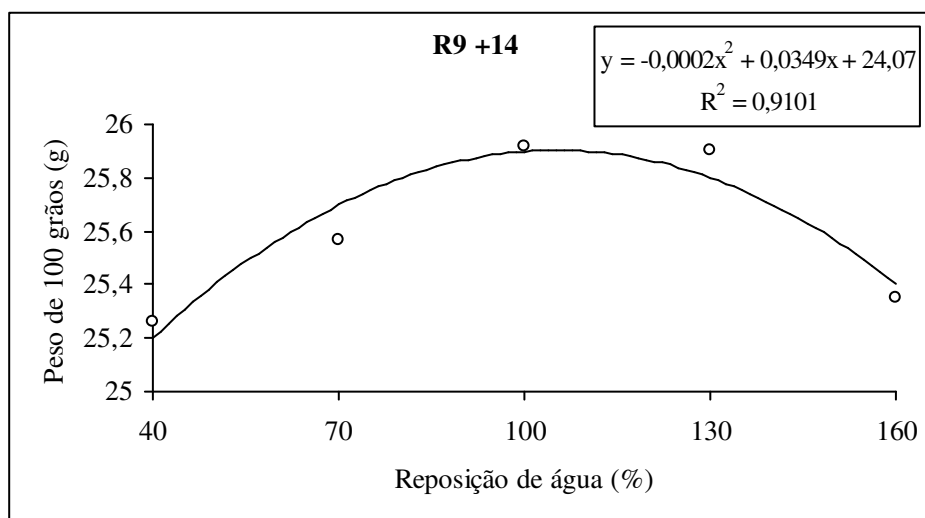


FIGURA 19. Peso de 100 grãos, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+14.

Na Tabela 16 são mostrados os valores médios do peso de 100 grãos, em função das épocas de suspensão da irrigação. Houve diferença significativa entre as médias quando se aplicou 100% de água, observando-se o maior peso de 100 grãos quando paralisou-se a irrigação em R9; porém, isso não resultou em maiores produtividades, como visto anteriormente (Tabela 9).

TABELA 16. Peso de 100 grãos (g) do feijoeiro para as diferentes reposições de água, em função das épocas de suspensão da irrigação.

Épocas	Reposição água (%)				
	40	70	100	130	160
R9	24,12 a ¹	25,74 a	26,92 a	25,93 a	25,37 a
R9 + 7	25,48 a	25,60 a	25,80 b	25,63 a	25,10 a
R9 + 14	25,26 a	25,57 a	25,92 b	25,90 a	25,35 a

¹As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

4.6 Número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem

Não houve diferença significativa entre os tratamentos aplicados, quando se comparam as médias do número de grãos por planta e número de vagens por planta (Tabela 17). Esses resultados diferem daqueles encontrados por Carvalho et al. (1996), Frizzone (1986), Garrido (1998) e Libardi (1996), mas são similares aos encontrados por Azevedo (1984) e Pinto (1985). Para essas variáveis, o valor do CV(%) foi acima do normalmente obtido, o que pode ser resultante do pequeno tamanho da amostra utilizada (apenas três plantas). Em trabalhos futuros, seria recomendável o aumento do tamanho de amostras ou do número de repetições.

TABELA 17. Resumo da análise de variância dos dados relativos ao número de grãos por planta (NGP), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrados médios		
		NGP	NVP	NGV
Reposição de água (R)	4	1689,72 ^{NS}	25,391 ^{NS}	1,45**
Época suspensão irrigação (E)	2	853,65 ^{NS}	9,60 ^{NS}	0,37 ^{NS}
R x E	8	551,77 ^{NS}	16,07 ^{NS}	0,14 ^{NS}
Bloco	3			
Erro	42			
CV(%):		24,64	21,41	15,10
Média geral:		106,65	22,65	4,69

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. ^{NS} não significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Para o número de grãos por vagem, houve diferença estatística apenas entre as lâminas de reposição (Tabela 17), constatando-se aumento dessa variável até 100% de reposição de água e, posteriormente, queda acentuada até 160% (Figura 20). Tanto a falta quanto o excesso de água provocam má formação dos grãos. Para Guimarães (1988), o estresse hídrico - que provoca aborto e quedas de flores - e o excesso de água no solo provocam redução no número de grãos e no seu peso. Garrido (1998) obteve aumento do número de grãos por vagem com acréscimos das lâminas, com valores médios de 4,6 grãos por vagem. Com menores lâminas aplicadas na cultura do feijoeiro, Libardi (1996) observou queda no número médio de grãos por vagem.

O modelo ajustado para o número de grãos por vagem (Figura 20) também parece indicar que, à semelhança do peso de 100 grãos, esta característica influenciou o rendimento de grãos.

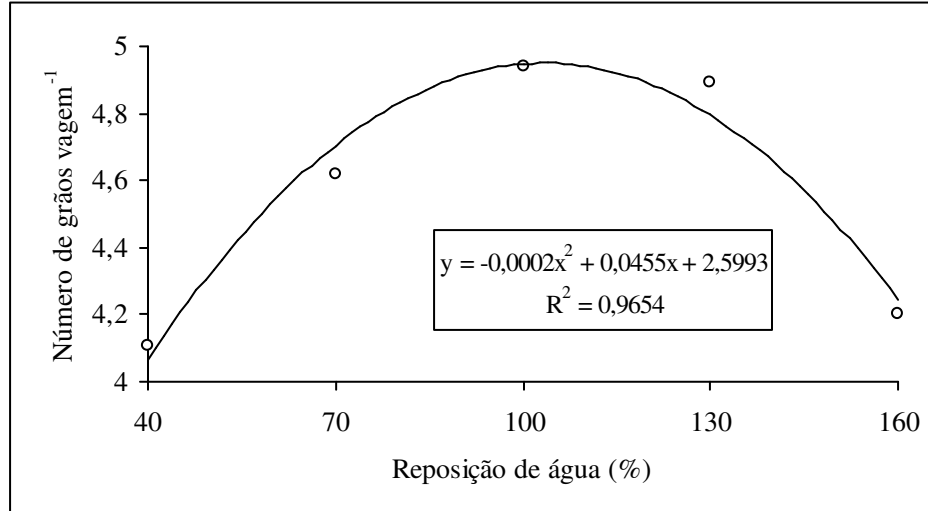


FIGURA 20. Número de grãos por vagem, em função da reposição de água.

Na Tabela 18 são mostradas as médias observadas para o número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem.

TABELA 18. Valores médios observados para número de grãos por planta (NGP), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV), em função dos níveis de reposição e épocas de suspensão da irrigação.

	NGP	NVP	NGV
Reposições (%)			
40	85,75	21,5	4,11
70	114,25	24,58	4,62
100	115,58	23,75	4,94
130	105,83	21,5	4,89
160	109,83	22,15	4,20
Épocas			
R9	101,10	22,25	4,54
R9+7	105,00	22,25	4,72
R9+14	113,85	23,45	4,81

4.7 Diâmetro do colo das plantas

A análise de variância revelou efeito significativo das lâminas de reposição aos 60 DAS e 75 DAS (Tabela 19). Isso significa que, até aos 45 DAS, não foi possível detectar diferenças no diâmetro, mas, a partir dos 60 DAS, o efeito das lâminas pode ser observado. Aos 60 e 75 DAS, o efeito das lâminas foi quadrático, com diâmetros máximos sendo obtidos próximos à reposição de 100% da lâmina (Figura 21). Na prática, tanto o déficit de água

como o excesso reduziram o desenvolvimento da haste principal em diâmetro. As médias verificadas aos 45 DAS encontram-se na Tabela 20.

TABELA 19. Resumo da análise de variância dos dados relativos ao diâmetro do colo (mm) da planta do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrados médios		
		45 DAS	60 DAS	75 DAS
Reposição de água	4	0,619 ^{NS}	2,09*	2,07*
Bloco	3			
Erro	12			
CV(%):		9,89	11,80	10,92
Média geral (mm):		5,85	6,11	6,33

*significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. ^{NS} não significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

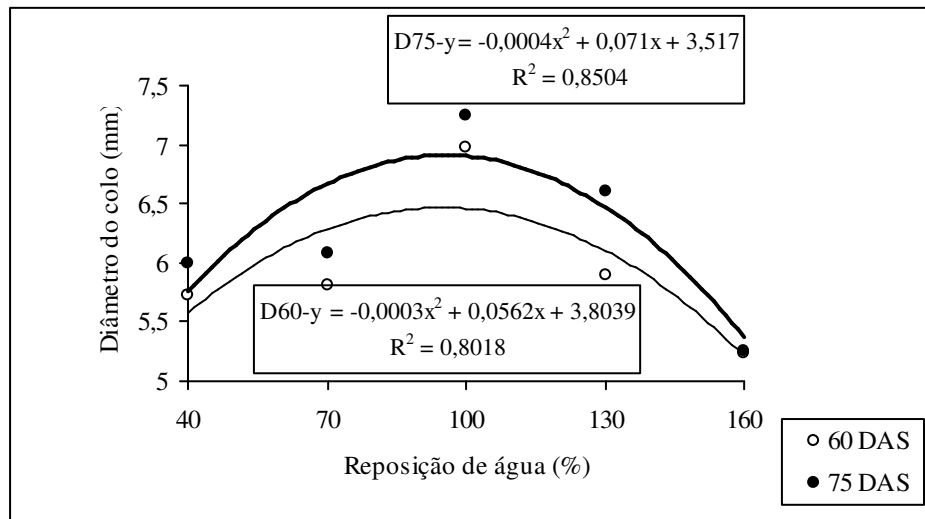


FIGURA 21. Diâmetro do colo das plantas do feijoeiro (mm), em função da reposição de água no solo.

TABELA 20. Valores médios observados para o diâmetro do colo das plantas, aos 45 DAS.

Reposições (%)	Diâmetro do colo (mm)
40	5,47
70	5,53
100	5,82
130	6,43
160	6,01

4.8 Massa seca das plantas

Para a massa seca das plantas, medida em R5 e R9, não foram observadas diferenças significativas entre as reposições de água no solo. Em R7, entretanto, houve efeito significativo (Tabela 21). Houve aumento da massa seca até a reposição de 100% e decréscimo, posteriormente (Figura 22). O decréscimo no acúmulo de massa seca em condição de estresse hídrico está associado à redução da área foliar (Resende et al., 1981).

A detecção do efeito das lâminas de reposição, justamente em R7, é relevante, já que, nesta etapa do ciclo cultural, é que se formam as vagens. Como não houve diferença em R5 (pré-floração) e R9 (maturação), o efeito pode ter sido diferencial e positivo sobre o peso das vagens. As médias observadas para a massa seca coletada em R5 e R9 são mostradas na Tabela 22.

TABELA 21. Resumo da análise de variância dos dados relativos à massa seca do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrados médios		
		R5	R7	R9
Reposição de água	4	4,66 ^{NS}	183,84*	53,03 ^{NS}
Bloco	3			
Erro	12			
CV(%):		34,60	36,04	33,38
Média geral (g):		9,37	18,95	43,71

*significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. ^{NS} não significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

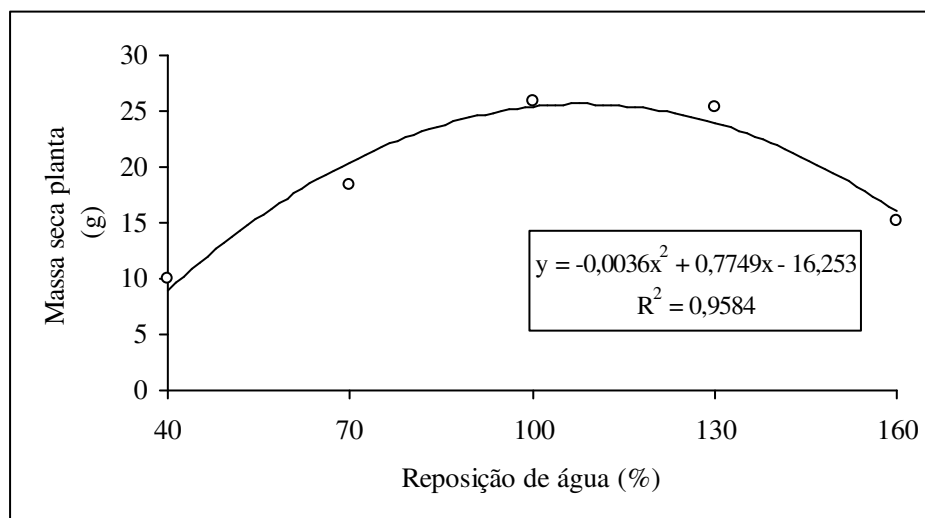


FIGURA 22. Massa seca das plantas do feijoeiro (g), em função da reposição de água no solo, no estágio R7.

TABELA 22. Valores médios observados para a massa seca das plantas em R5 e R9.

Reposições (%)	Massa seca (g) R5	Massa seca (g) R9
40	8,46	44,23
70	10,97	45,76
100	9,8	48,41
130	9,29	40,43
160	8,33	39,74

4.9 Eficiência do uso da água

A análise de variância revelou efeito significativo das lâminas de reposição, das épocas de suspensão da irrigação e da interação entre os fatores (Tabela 23).

Independente da época de suspensão da irrigação, observaram-se menores valores de eficiência do uso da água com o aumento da reposição de água no solo (Figuras 23, 24 e 25). Valores semelhantes foram encontrados por Frizzone (1986) e Garrido (1998), contrastando com resultados encontrados por Felipe (1991), o qual aplicou lâminas entre 169 e 289 mm.

Na Tabela 24, verifica-se que, quando irriga-se com reposição de 100%, uma maior eficiência do uso da água se dá na época R9. Para as demais reposições, não houve diferença estatística entre as médias observadas.

TABELA 23. Resumo da análise de variância dos dados relativos à eficiência do uso da água. Patos de Minas, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	Quadrado médio
Reposição de água (R)	4	82,55*
Época suspensão irrigação (E)	2	1,05*
R x E	8	1,01*
Bloco	3	
Erro	42	
CV(%):	10,81	
Média geral (kg mm ⁻¹):	5,99	

*significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

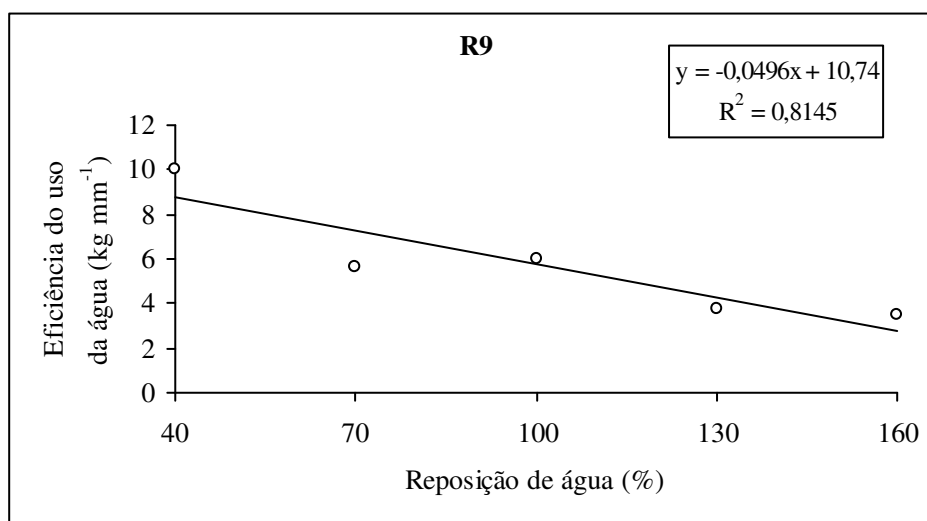


FIGURA 23. Eficiência do uso da água, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9.

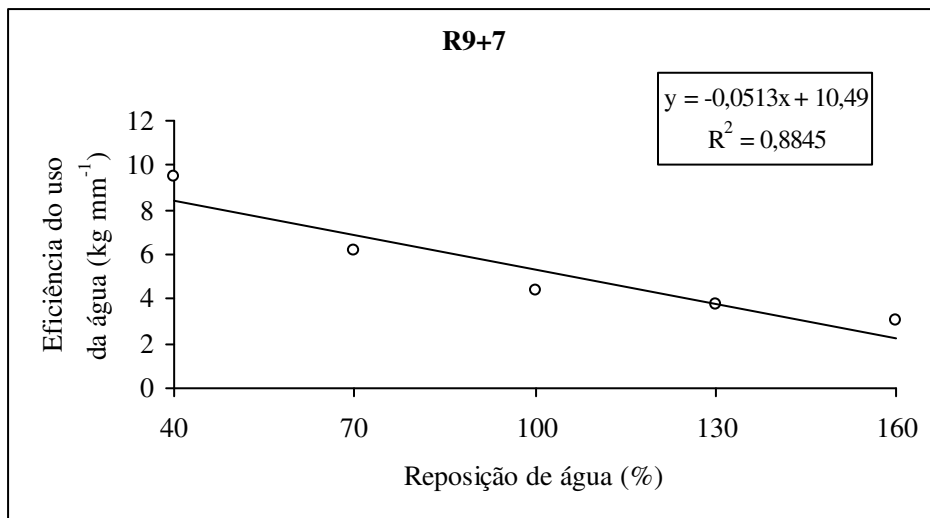


FIGURA 24. Eficiência do uso da água, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+7.

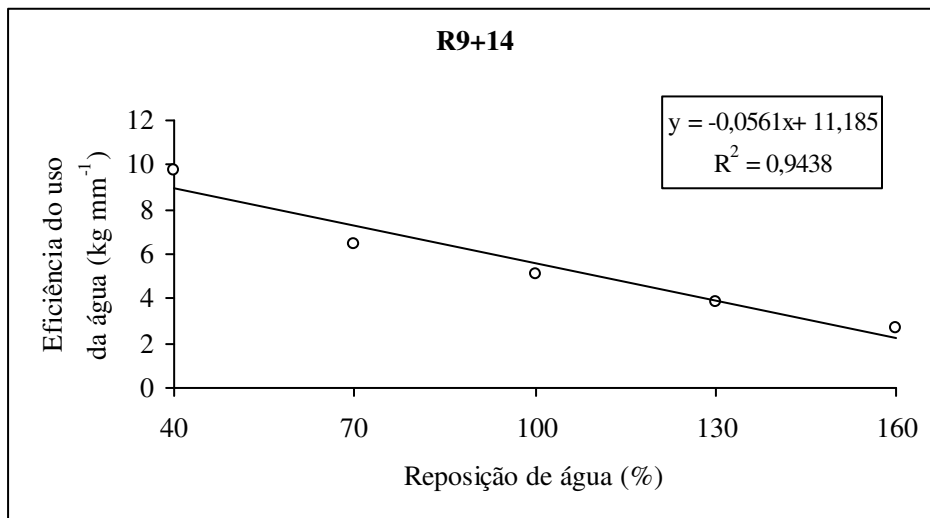


FIGURA 25. Eficiência do uso da água, em função da reposição de água de irrigação, interrompendo-se a irrigação em R9+14.

TABELA 24. Eficiência do uso da água, em kg mm^{-1} , para as diferentes reposições de água, em função das épocas de suspensão da irrigação.

Épocas	Reposição água (%)				
	40	70	100	130	160
R9	10,00 a ¹	5,65 a	6,00 a	3,73 a	3,52 a
R9 + 7	9,76 a	6,16 a	4,41 b	3,73 a	3,05 a
R9 + 14	9,49 a	6,48 a	5,12 b	3,84 a	2,66 a

¹As médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Deve ser observado que o conceito de eficiência do uso da água é relativo, ou seja, maior eficiência não significa maior produtividade. Este fato é melhor constatado quando comparam-se as Figuras 23, 24 e 25 com as Figuras 4, 5 e 6.

4.10 Coeficiente de cultura

4.10.1 Precipitação e lâminas aplicadas

Os valores de lâmina aplicada (mm) e precipitação (mm), durante a condução experimental, estão apresentados na Figura 26. Vale ressaltar que os dados apresentados nesse tópico referem-se às médias coletadas nas parcelas do tratamento 100% de reposição de água e suspensão da irrigação em R9+14.

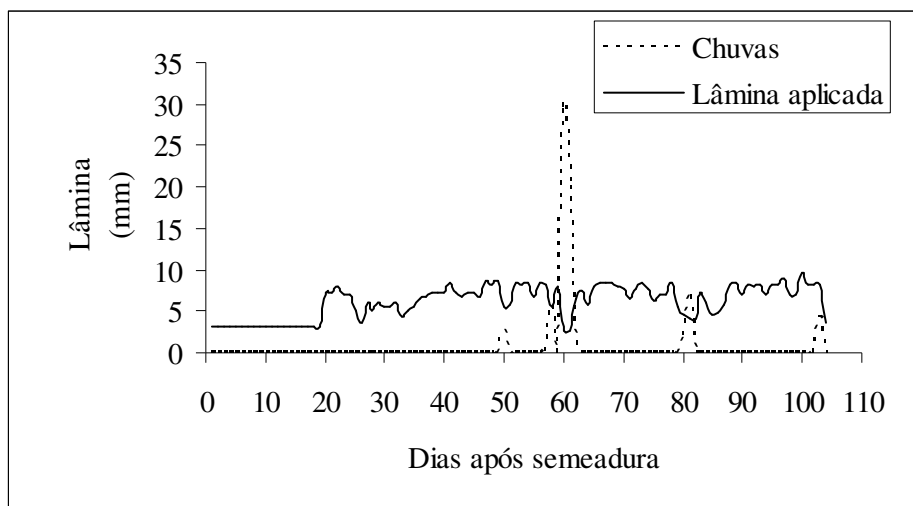


FIGURA 26. Precipitação e lâmina de água aplicada durante a condução do experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

4.10.2 Deflúvio superficial

A equação 23 descreve a infiltração acumulada no solo do experimento, em função do tempo. A velocidade de infiltração básica média observada na área experimental foi de $11,86 \text{ mm h}^{-1}$.

$$I = 2,56T^{0,5313} \quad (23)$$

em que:

I = infiltração acumulada (mm);

T = tempo (min).

Como a cultura foi implantada em nível não, foram detectados, durante a condução do experimento, sinais de escoamento superficial. Além disso, as lâminas precipitadas foram menores que aquela que o solo potencialmente poderia infiltrar para um dado período (exceto aos 60 DAS).

4.10.3 Movimento da água no contorno inferior

Nas Figuras 27 a 32, são mostradas as tensões médias verificadas durante a condução do experimento, para as diferentes épocas de suspensão da irrigação e camadas de controle de 0-20 cm e 20-40 cm. Com era esperado, lâminas deficitárias (40% e 70%) promoveram, em todas as situações, maiores valores de tensão.

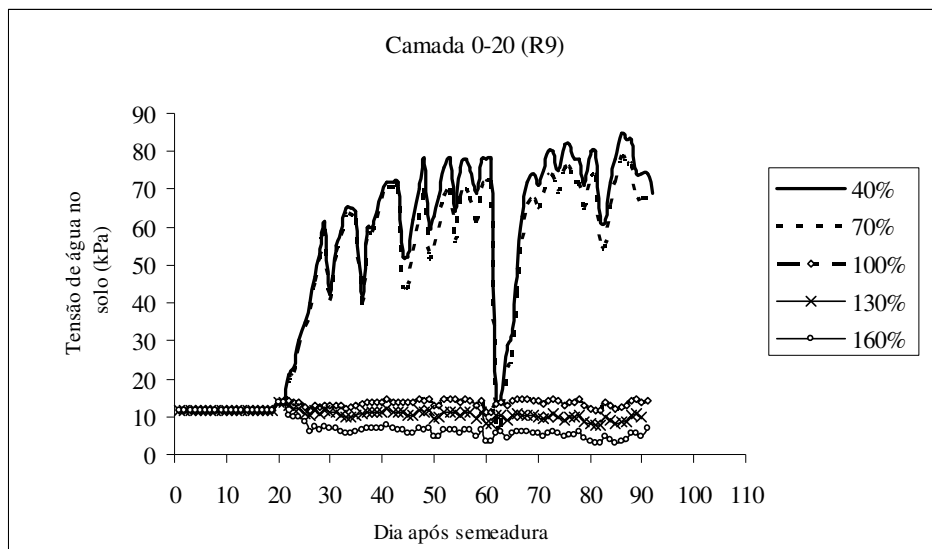


FIGURA 27. Tensão média de água no solo, para a camada de 0-20 cm e época de suspensão da irrigação R9.

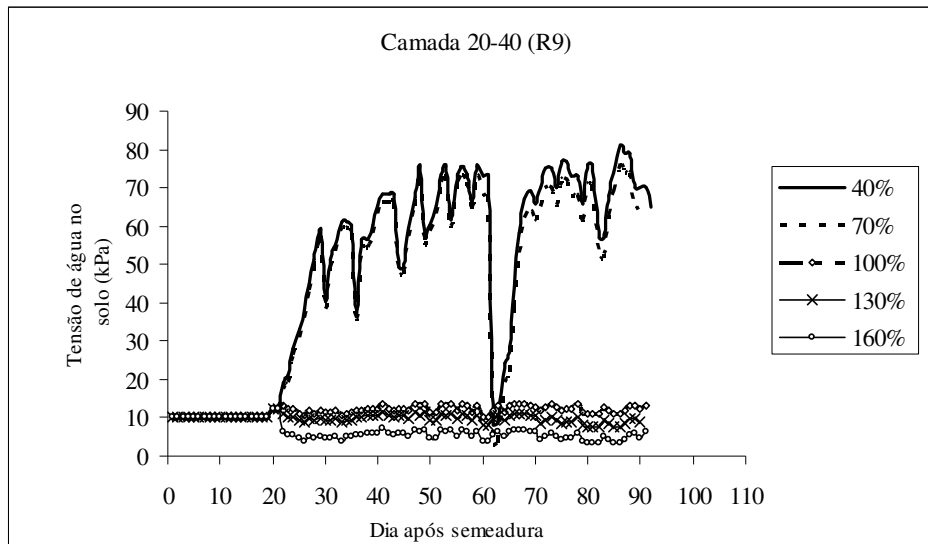


FIGURA 28. Tensão média de água no solo, para a camada de 20-40 cm e época de suspensão da irrigação R9.

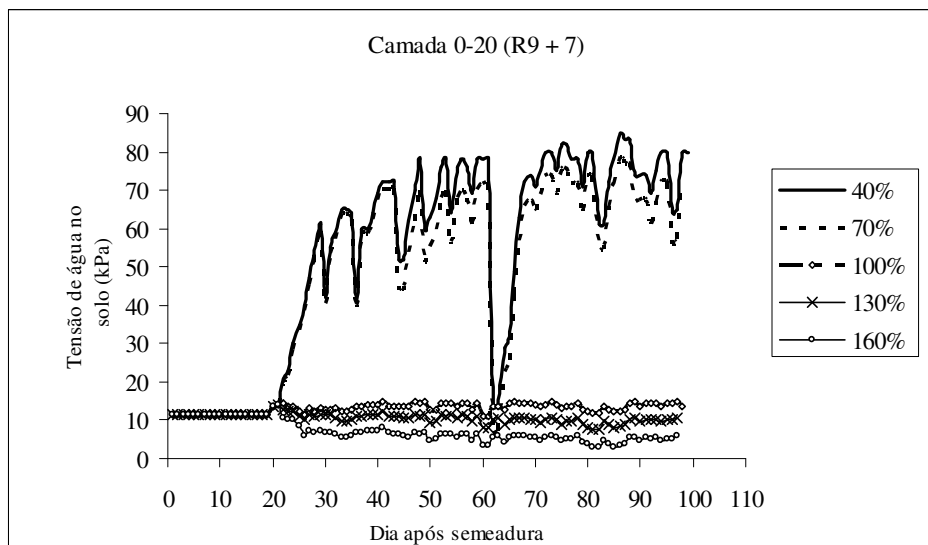


FIGURA 29. Tensão média de água no solo, para a camada de 0-20 cm e época de suspensão da irrigação R9+7.

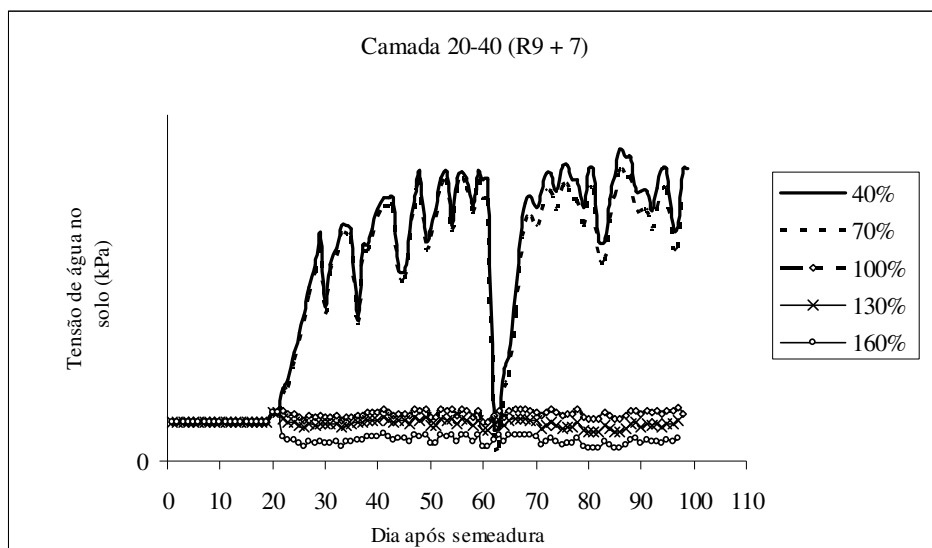


FIGURA 30. Tensão média de água no solo, para a camada de 20-40 cm e época de suspensão da irrigação R9+7.

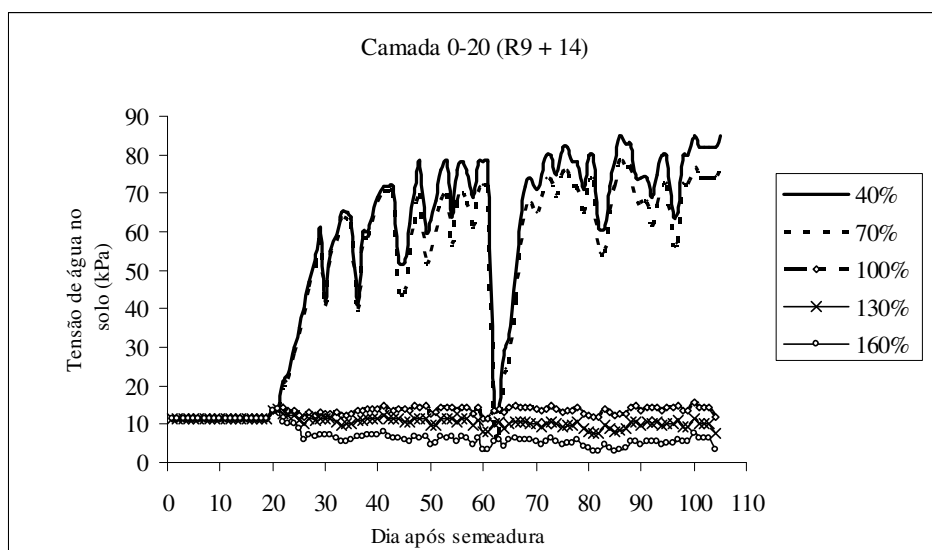


FIGURA 31. Tensão média de água no solo, para a camada de 0-20 cm e época de suspensão da irrigação R9+14.

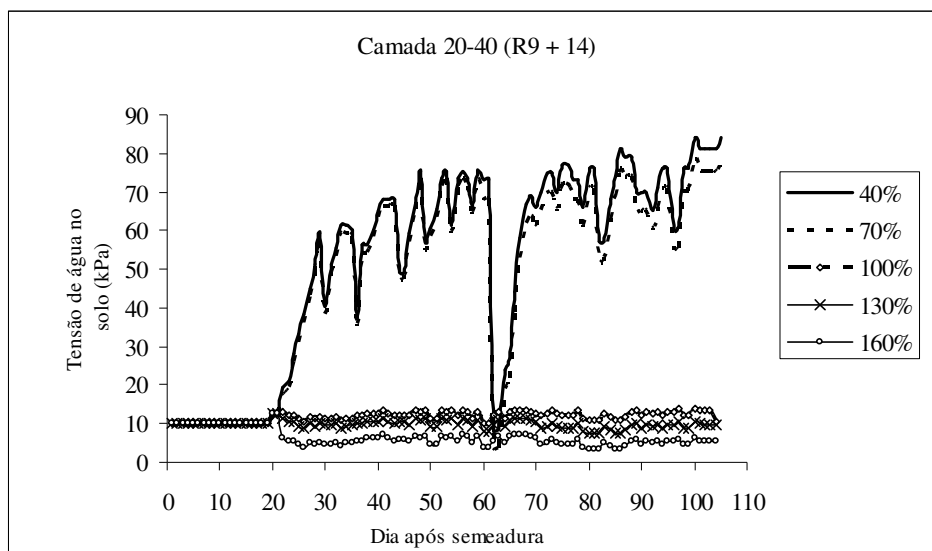


FIGURA 32. Tensão média de água no solo, para a camada de 20-40 cm e época de suspensão da irrigação R9+14.

Na Tabela 25, são apresentadas as tensões médias de água no solo registradas pelos tensiômetros instalados nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, para as diferentes épocas de suspensão da irrigação. Observa-se que a tensão de água no solo é inversamente proporcional às reposições de água.

As variações do potencial total medidas nas parcelas do tratamento 100% e R9+14 são apresentadas na Figura 33. Nota-se que a camada superior apresenta valores mais elevados que a camada imediatamente inferior, proporcionando, possivelmente, a drenagem interna para essa camada. Comportamento semelhante foi observado por Oliveira (2003).

TABELA 25. Tensão média de água no solo (kPa) para diferentes reposições de água e épocas de suspensão da irrigação. Patos de Minas, MG, 2005.

Reposição (%)	Época de paralisação da irrigação					
	R9		R9+7		R9+14	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Tensão de água no solo (kPa)						
40	51,7	48,6	53,3	50,2	55,0	52,0
70	47,0	45,4	48,3	46,7	50,5	49,1
100	12,9	11,6	13,0	11,7	13,0	11,8
130	10,4	9,7	10,4	9,7	10,5	9,8
160	7,0	6,4	7,0	6,3	6,9	6,2

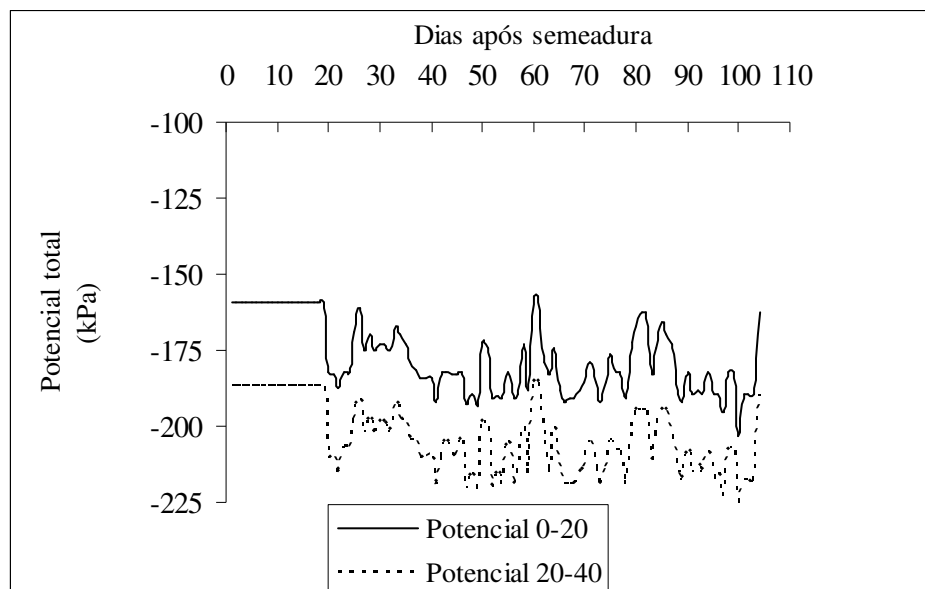


FIGURA 33. Variação do potencial total com o tempo, para o solo estudado e diferentes camadas. Patos de Minas, MG, 2005.

A condutividade hidráulica saturada média para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm foram de 7,69 cm dia⁻¹ e 8,5 cm dia⁻¹, respectivamente. Oliveira (2003) também encontrou maiores valores de condutividade hidráulica nas camadas inferiores de um Latossolo Vermelho Distrófico Típico, na região de Lavras, MG.

4.10.4 Armazenamento de água no solo

Verifica-se, na Figura 34, a variação do armazenamento de água no solo para a camada de 0-40 cm, durante o período analisado. O armazenamento total de água no solo durante o período experimental encontra-se na Figura 35.

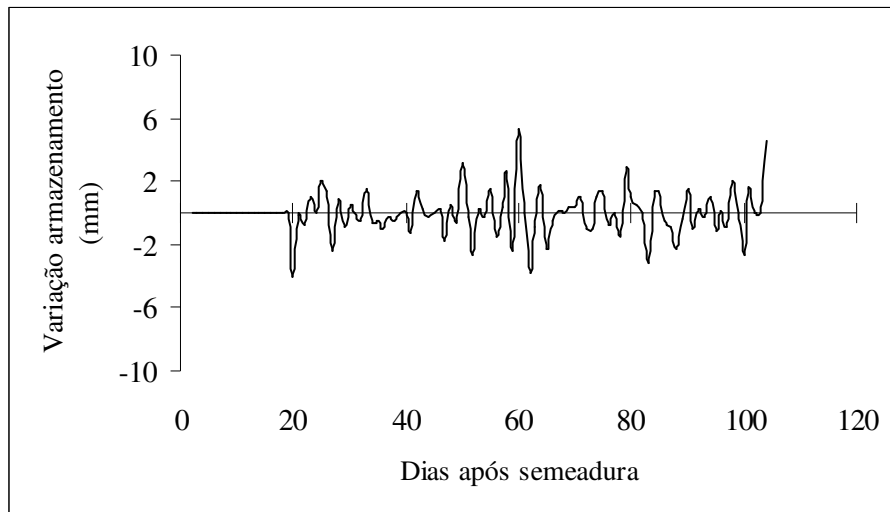


FIGURA 34. Variação do armazenamento de água no solo para a camada de controle de 0-40 cm. Patos de Minas, MG, 2005.

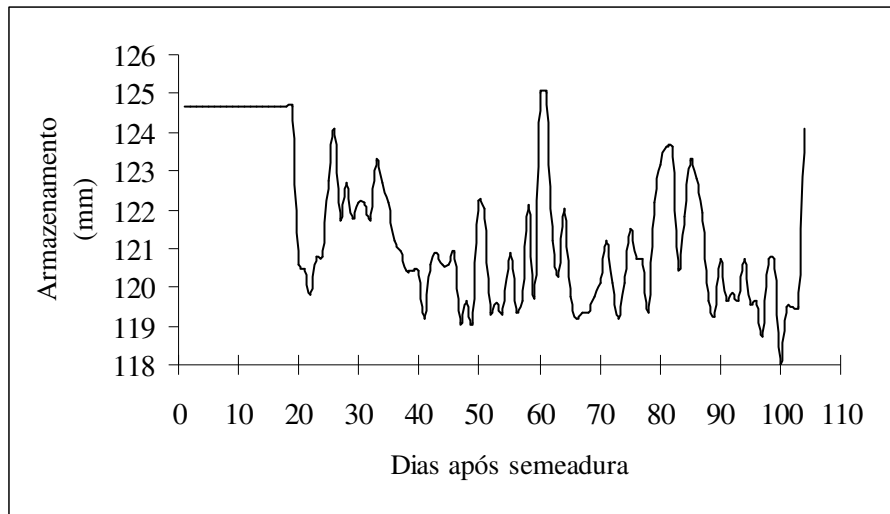


FIGURA 35. Armazenamento total de água durante época experimental, para a camada de 0-40 cm. Patos de Minas, MG, 2005.

4.10.5 Evapotranspiração de referência

Os valores de evapotranspiração de referência são mostrados na Figura 36. Alguns valores altos de evapotranspiração (maiores que 7 mm dia^{-1}) observados em alguns dias durante a condução do experimento foram devido ao excesso de vento e altas temperaturas nesses dias, culminando em aumento da evaporação e, conseqüentemente, da evapotranspiração de referência.

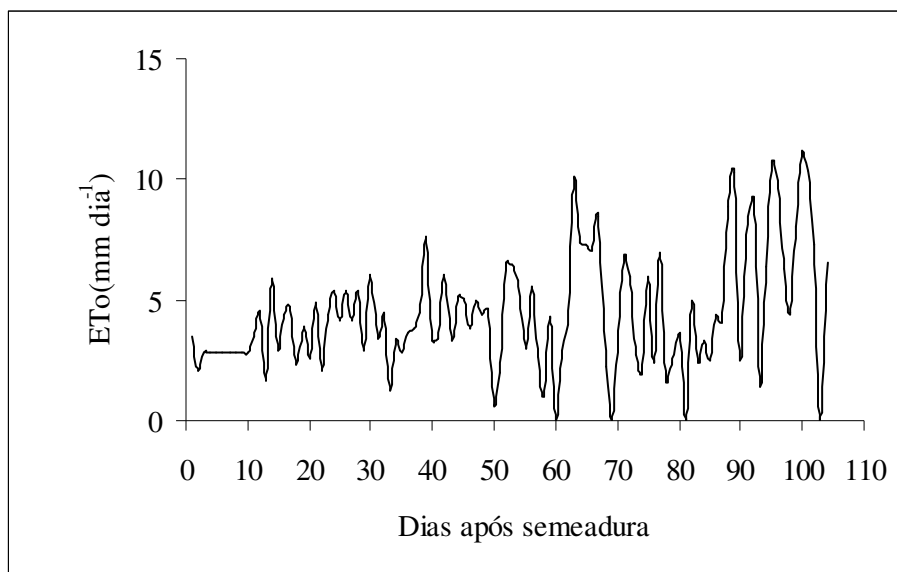


FIGURA 36. Evapotranspiração de referência observada durante a condução do experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

4.10.6 Coeficiente e evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração diária do feijoeiro cultivar Talismã, cultivada em Patos de Minas, MG, consta na Figura 37. Na Figura 38, são mostrados os valores, médios a cada decêndio, com uma equação de 2º grau, ajustada aos dados, observando-se claramente a tendência de aumento nas fases de floração/enchimento de grãos e posterior diminuição até o final do ciclo. Esses resultados concordam com os obtidos por Azevedo (1984), Encarnação (1980), Garrido (1998), Garrido & Teixeira (1978) e Reichardt et al. (1974).

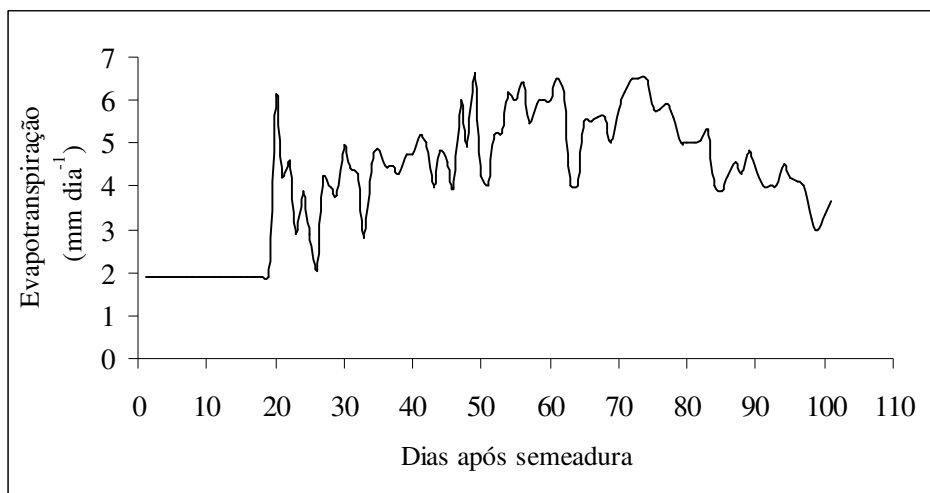


FIGURA 37. Evapotranspiração diária da cultura, observada durante a condução do experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

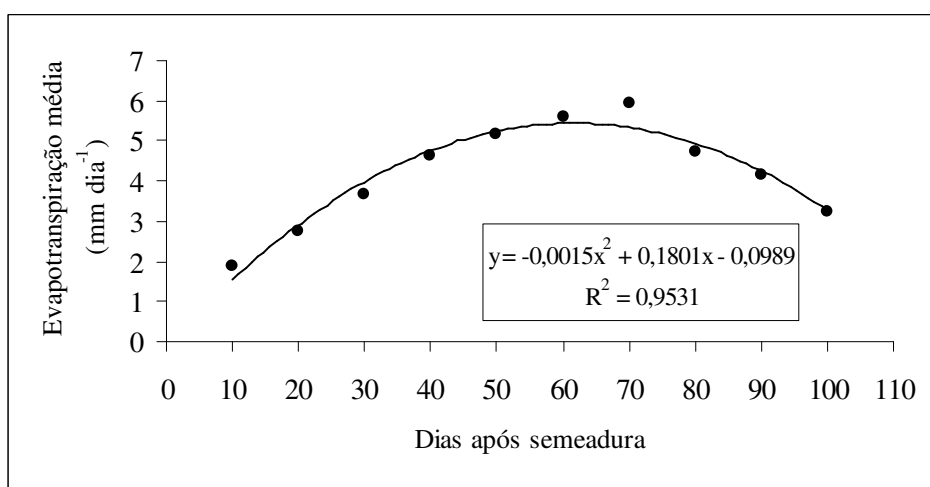


FIGURA 38. Evapotranspiração média (decencial) da cultura, observada durante a condução do experimento.

Os valores de K_c diários são apresentados na Figura 39 e a média observada em períodos de 10 dias, com sua respectiva equação ajustada, na

Figura 40. Esses valores apresentaram tendência semelhante à observada na evapotranspiração da cultura. Comparando-se estes dados com os obtidos por Mantovani (1986) e aqueles indicados por Doorenbos & Kassam (1979), relatados na Tabela 26, nota-se que, embora apresentem tendência, são diferentes. O primeiro autor realizou experimento na região de Viçosa, MG e os outros pesquisadores obtiveram os valores médios em diversos experimentos, com cultivares diferentes. O coeficiente de cultura (K_c) varia com a cultura, com seu estágio de desenvolvimento, com o clima e com as práticas agrônômicas adotadas. Para a maioria das culturas, o valor de K_c aumenta desde um valor mínimo na germinação até um valor máximo, quando a cultura atinge seu pleno desenvolvimento e decresce a partir do início da maturação (Oliveira, 2003). Este comportamento foi observado, com a cultivar Talismã, no presente estudo (Tabela 26).

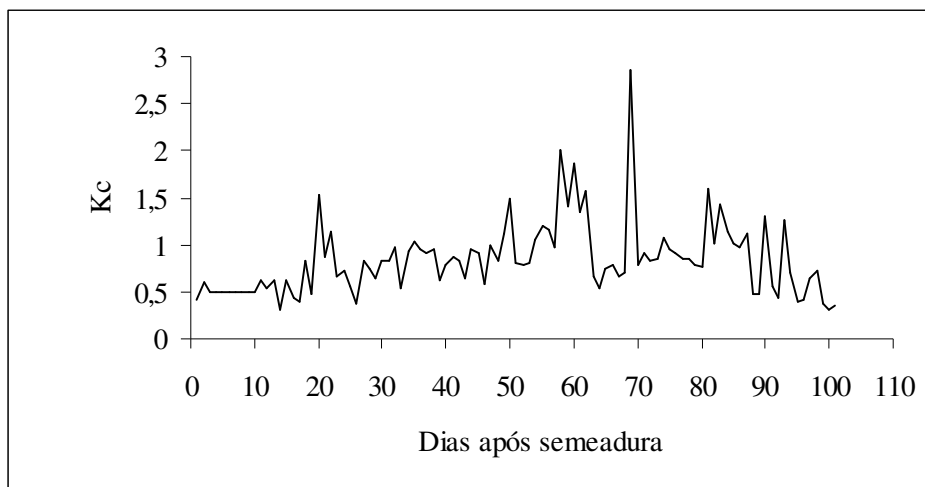


FIGURA 39. Coeficiente da cultura diário observado durante a condução do experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

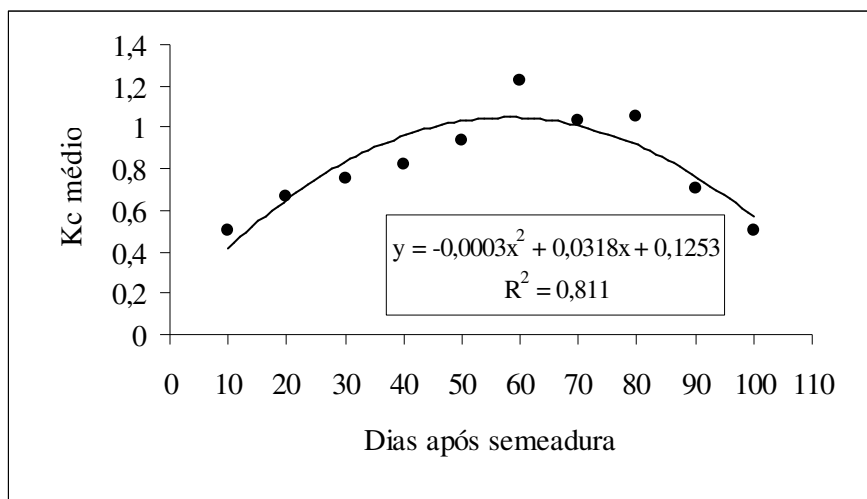


FIGURA 40. Coeficiente da cultura médio (decendial) observado durante a condução do experimento.

TABELA 26. Coeficientes da cultura médios, para diferentes estágios de desenvolvimento do feijoeiro, indicados por Mantovani (1986), Doorenbos & Kassam (1979) e o atual experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

Estágios	Mantovani (1986)	Doorenbos & Kassam (1979)	Atual experimento
Inicial	1,05	-	0,50
I	0,61	0,30	0,53
II	0,80	0,70	0,81
III	1,37	1,05	1,07
IV	0,65	0,65	0,78

Inicial – sementeira a germinação; I – germinação até 10% da cobertura do solo; II – 10% da cobertura do solo até 80% da cobertura do solo; III – 80% da cobertura do solo até o início do amadurecimento; IV – início do amadurecimento até colheita.

Os coeficientes de cultura médios propostos por Stone & Silva (1999) são comparados com os obtidos no atual experimento (Tabela 27). Deve-se ressaltar que as condições de trabalho dos autores citados são diferentes das apresentadas neste trabalho, como semeadura realizada em plantio direto e a utilização da cultivar Aporé, evidenciando a importância da obtenção dos Kc(s) de forma regional.

TABELA 27. Coeficientes de cultura médios para diferentes épocas de desenvolvimento do feijoeiro, propostos por Stone & Silva (1999) e pelo atual experimento. Patos de Minas, MG, 2005.

Dias após emergência	Stone & Silva (1999)	Atual experimento
0-14	0,49	0,50
15-24	0,69	0,76
25-34	0,77	0,72
35-44	0,9	0,85
45-54	1,06	0,93
55-64	0,89	1,27
65-74	0,74	1,02
75-84	0,48	1,03
85-final	0,27	0,76

Bergamaschi (1989) encontrou valores de Kc entre 0,48 e 1,07, em estudo realizado na região de Piracicaba, SP, mostrando uma tendência semelhante à do atual experimento (Tabela 28). Na Tabela 29 são apresentados valores do Kc em cada estágio fenológico do feijoeiro e sua duração, verificada nas condições estudadas. Durante o estágio R6, foi verificada a maior média de Kc, de 1,25, seguido do estágio R8, com 1,02. As menores médias de Kc foram verificadas nos estágios VO e V1, sendo, respectivamente, de 0,5 e 0,49.

TABELA 28. Coeficientes da cultura para diferentes estágios de desenvolvimento do feijoeiro, propostos por Bergamaschi (1989) e pelo atual experimento, Patos de Minas, MG, 2005.

Estágios	Bergamaschi (1989)	Atual experimento
Semeadura-emergência	0,48	0,50
V1-V4	0,56	0,62
V4-R5	0,77	0,79
R5-R6	1,02	0,98
R6-R8	1,07	1,13
R8-R9	0,92	1,09
R9-colheita	-	0,80

TABELA 29. Coeficientes da cultura para diferentes estágios de desenvolvimento do feijoeiro. Patos de Minas, MG, 2005.

Estágio da cultura	Duração (dias)	Kc
V0	0-3	0,50
V1	4-8	0,49
V2	9-15	0,52
V3	16-25	0,74
V4	26-44	0,80
R5	45-50	0,96
R6	51-59	1,25
R7	60-66	0,90
R8	67-85	1,02
R9	86-Final	0,77

4.11 Eficiência econômica da lâmina de água

Os produtos físicos marginais (PFMa) foram obtidos a partir das funções de produção (Figuras 41, 42 e 43) estimadas para cada fase de suspensão da irrigação, sendo geradas as equações 24, 25 e 26.

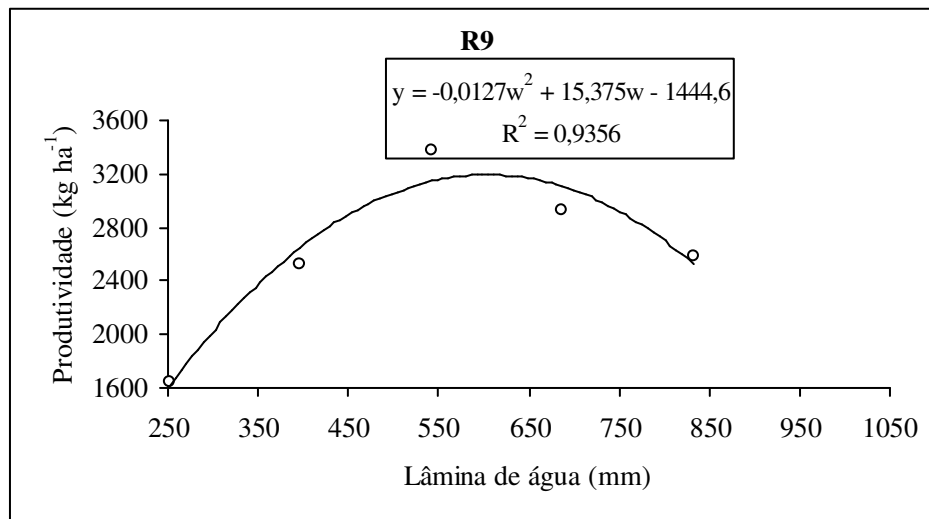


FIGURA 41. Produtividade do feijoeiro cultivar Talismã, em função das lâminas de água aplicadas, até R9. Patos de Minas, MG, 2005.

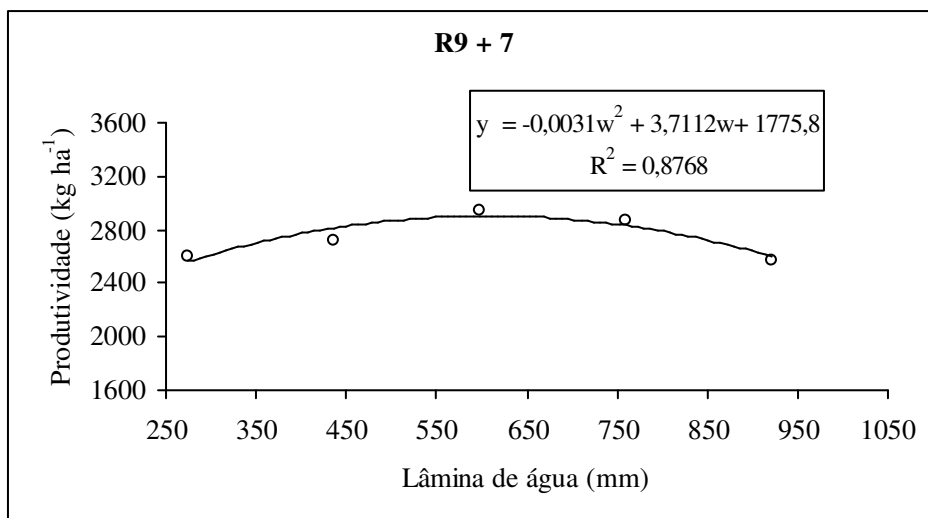


FIGURA 42. Produtividade do feijoeiro cultivar Talismã, em função das lâminas de água aplicadas, até R9+7. Patos de Minas, MG, 2005.

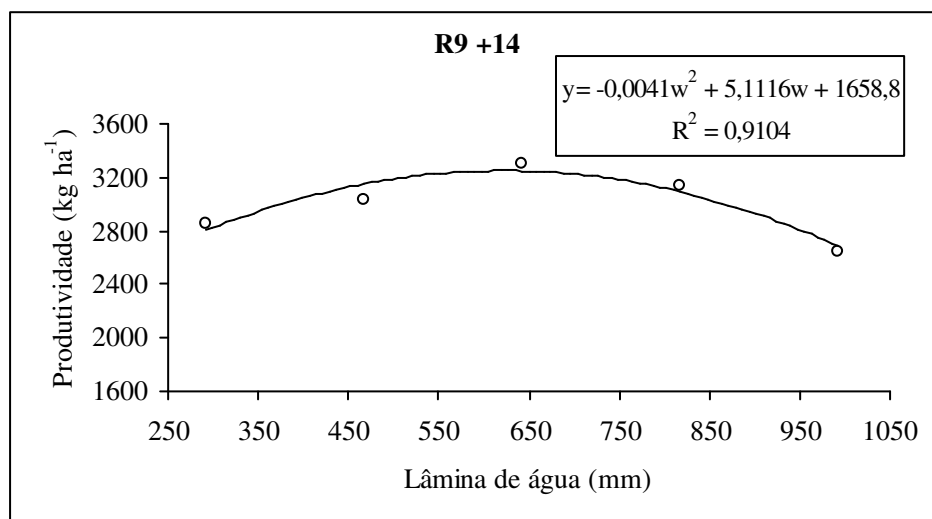


FIGURA 43. Produtividade do feijoeiro cultivar Talismã, em função das lâminas de água aplicadas, até R9+14. Patos de Minas, MG, 2005.

$$- R9: y = -0,0127w^2 + 15,375w - 1444,6 \quad (R^2 = 93,65\%) \quad (24)$$

$$- R9+7: y = -0,0031w^2 + 3,7112w + 1775,8 \quad (R^2 = 87,68\%) \quad (25)$$

$$- R9+14: y = -0,0041w^2 + 5,116w + 1658,8 \quad (R^2 = 91,04\%) \quad (26)$$

Considerou-se como lâmina de água economicamente ótima aquela que conduziu ao rendimento com máxima margem bruta. Dessa forma derivou-se a estimativa das funções de produção, obtendo-se o valor do produto físico marginal (PFMa) e, em seguida, igualou-se à relação preço da água e do produto (Carvalho, 1995; Pereira, 2005).

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = 15,375 - 0,0254W = \frac{P_w}{P_y} \quad (27)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = 3,7112 - 0,0062W = \frac{P_w}{P_y} \quad (28)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = 5,11166 - 0,0082W = \frac{P_w}{P_y} \quad (29)$$

Quando o valor do PFMa atinge o valor zero, conclui-se que a lâmina aplicada proporcionou a produtividade física máxima. Igualando-se à primeira derivada a zero (PFMa=0), as maiores produtividades físicas são mostradas na Tabela 30, para as épocas de suspensão da irrigação R9, R9+7 e R9+14. Vale ressaltar que as lâminas ótimas físicas diferem dos valores encontrados na Tabela 9 (médias de produtividade em função da reposição de água), por terem sido ajustadas em função das lâminas de água e não dos níveis de reposição de água. Adotando-se as lâminas físicas estimadas na Tabela 30 como 100% de reposição, nota-se que os valores relativos das lâminas ótimas econômicas são, para R9, R9+7 e R9+14, de 97,46%, 89,49% e 92,37%, respectivamente. Frizzone (1986), trabalhando com a cultivar Carioca e seis lâminas de irrigação variando entre 105 e 621 mm, observou uma resposta quadrática do rendimento

da cultura, sendo a produtividade máxima de 1.871 kg ha⁻¹, para uma lâmina de 533 mm. Já Carvalho (1992), trabalhando com a mesma cultivar do autor anterior, na região de Sete Lagoas, MG, e lâminas entre 272 e 416 mm, obteve rendimento físico máximo de 2.112 kg ha⁻¹, com uma lâmina de 360 mm. Garrido (1998) encontrou rendimento máximo de 1.630 kg ha⁻¹, para uma lâmina de 417,8 mm. Azevedo (1984) constatou produtividade física máxima de 905 kg ha⁻¹ e lâmina de 394 mm, e Felipe (1991) de 1.436 kg ha⁻¹ e lâmina de 312 mm. Os rendimentos máximos obtidos no atual experimento, bem como as correspondentes lâminas, foram superiores aos valores apresentados pelos autores citados.

TABELA 30. Lâminas que proporcionaram máxima produtividade física estimada (L.F.), produtividade física máxima estimada (P.F.), lâminas que proporcionaram máxima produtividade econômica (L.O.), produtividade economicamente ótima (P.O.), porcentagem que a lâmina ótima econômica representa da lâmina física estimada (% L.F.) e lucro, encontrados para as diferentes épocas de paralisação da irrigação.

Épocas	L.F. (mm)	P.F. (R\$ ha ⁻¹)	L.O. (mm)	%L.F.	P.O. (R\$ ha ⁻¹)	LUCRO (R\$ ha ⁻¹)
R9	605,31	3.208,75	589,97	97,46	3.205,76	1.245,39
R9+7	598,58	2.886,52	535,72	89,49	2.874,26	810,89
R9+14	623,36	3.251,99	575,84	92,37	3.242,73	1.304,86

Ainda na Tabela 30, são apresentadas as lâminas ótimas econômicas obtidas igualando-se as expressões dos valores de PFMa ao preço do fator variável. Ressalta-se que foram considerados os custos relativos ao mês de

outubro de 2006; os lucros máximos para as épocas R9, R9+7 e R9+14 são de R\$ 1.245,39; R\$ 810,89 e R\$ 1.304,86, respectivamente.

Na Figura 44 é apresentada a variação da lâmina ótima econômica em função da variação da relação P_w/P_y , para as diferentes épocas de suspensão da irrigação, com tendência semelhante à observada por Pereira (2005). Os menores valores de lâminas economicamente ótimas ocorreram para R9+7, para uma mesma relação. Como exemplo, analisa-se uma relação custo benefício de 50% ($P_w/P_y=0,5$); a lâmina ótima econômica foi de 585,62 mm, 517,93 mm e 549,59 mm, para R9, R9+7 e R9+14, respectivamente.

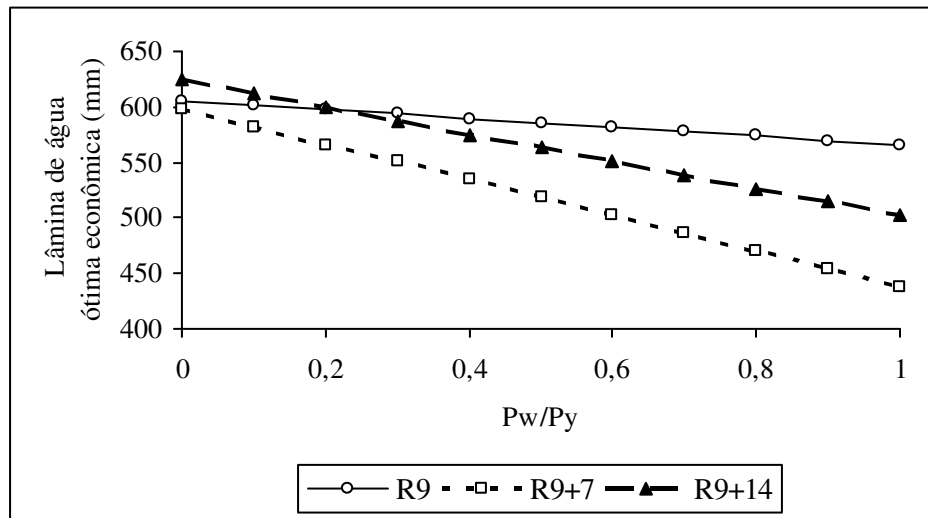


FIGURA 44. Lâmina total de água economicamente ótima, em função da relação entre o preço da água e o preço do feijão, para as diferentes épocas de paralisação da irrigação.

A partir do ponto em que PFMa apresentou valor nulo, a aplicação de maiores lâminas de água conduziu a valores de PFMa negativos (Tabela 31), indicando ser antieconômico o uso dessas lâminas. Mesma tendência foi observada por Pereira (2005).

TABELA 31. Produtos físicos marginais (PFMa), para cada época de suspensão da irrigação e diferentes lâminas totais aplicadas.

R9		R9+7		R9+14	
Lâmina (mm)	PFMa	Lâmina (mm)	PFMa	Lâmina (mm)	PFMa
251,81	8,97	273,95	2,01	292,02	2,71
396,94	5,29	435,69	1,00	467,32	1,28
542,08	1,60	597,43	0,007	642,62	-0,15
687,22	-2,08	759,27	-0,99	817,92	-1,59
832,36	-5,76	920,91	-1,99	993,21	-3,03

4.12 Síntese dos resultados

Verificou-se efeito significativo dos níveis de reposição de água, da época de suspensão da irrigação, bem como da interação entre os fatores, em: produtividade da cultura, número e peso de grãos não colhidos, peso de 100 grãos e eficiência do uso da água. No número de vagens verdes não foi observado efeito significativo entre a interação dos fatores estudados. Não houve diferença significativa no número de grãos por planta e vagens por planta. Houve efeito apenas das lâminas de reposição no número de grãos por vagem. A massa seca no estágio R7 e o diâmetro do colo das plantas, medido aos 60 e 75 DAS, apresentaram médias diferentes em função da reposição de água no solo.

Independente da época de suspensão da irrigação, houve aumento da produtividade quando se irrigou próximo a 100% de reposição. Lâminas excessivas e deficitárias promoveram os menores valores de produtividade. A suspensão da irrigação em R9 resultou em menor produtividade nas reposições de 40%, 70% e 130%, sendo iguais quando se irrigou com 100% e 160% de reposição.

O número e o peso de grãos não colhidos seguiram, praticamente, a mesma tendência, ou seja, queda linear, com aumento da reposição de água,

quando foi suspensa a irrigação em R9 e R9+7, e decréscimo menos acentuado quando se paralisou a irrigação em R9+14. Constatou-se também que o número de grãos não colhidos foi maior com 100% de reposição e suspensão da irrigação em R9.

O aumento do nível de reposição de água no solo favoreceu o acréscimo do número de vagens verdes, sendo também observado quando se suspendeu a irrigação em R9+14.

O maior peso de 100 grãos foi verificado quando se irrigou com lâminas próximas a 100% de reposição, independente da época de suspensão da irrigação. Lâminas com 100% de reposição e interrupção da irrigação em R9 promoveram os maiores valores de peso de 100 grãos.

Houve queda linear da eficiência do uso da água com o aumento da reposição de água no solo.

Os valores do coeficiente de variação para o número de grãos por planta, vagens por planta e grãos por vagem foram considerados um pouco acima do normal verificado no trabalho, devido, possivelmente, ao número reduzido de plantas amostradas (o que pode também ter influenciado na não significância dos fatores).

Para a massa seca em R7 e o diâmetro do colo da planta (aos 60 e 75 DAS), foi observada maior média quando a lâmina de água foi repostada integralmente ao solo.

As tensões médias de água no solo, verificadas durante a condução do experimento, variaram entre 6,3 kPa e 53 kPa, e os menores valores para lâminas de reposição de 160% e suspensão da irrigação em R9+7 e R9+14.

Os valores de evapotranspiração e coeficiente da cultura seguiram uma tendência de aumento próximo à fase de formação/enchimento dos grãos.

Os menores valores de Kc foram verificados nos estágios V0 e V1 (0,5 e 0,49) e os maiores em R6 e R8 (1,25 e 1,02); e para os estágios inicial, I, II, III e IV, foram, respectivamente de 0,5; 0,53; 0,81; 1,07 e 0,78.

Quando a suspensão da irrigação foi realizada em R9, a máxima produtividade física foi de 3.208,75 kg ha⁻¹, com uma lâmina de 605,31 mm. A produtividade ótima econômica foi de 3.205,76 kg ha⁻¹, para uma lâmina de 589,97 mm.

Suspendendo a irrigação em R9+7, a máxima produtividade física foi de 2.886,52 kg ha⁻¹, com uma lâmina de 598,58 mm. A produtividade ótima econômica foi de 2.874,26 kg ha⁻¹, para uma lâmina de 535,72 mm.

Para R9+14, a máxima produtividade física foi de 3.251,99 kg ha⁻¹, com uma lâmina de 623,36 mm. A produtividade ótima econômica foi de 3.242,73 kg ha⁻¹, para uma lâmina de 575,84 mm.

A maior produtividade economicamente ótima foi verificada quando a irrigação prosseguiu até próximo à colheita (R9+14), com lucro de R\$ 1.304,86 ha⁻¹.

5 CONCLUSÕES

1. A produtividade, o peso de 100 grãos, o diâmetro do colo da planta aos 60 e 75 DAS e a massa seca em R7 foram prejudicados quando os níveis de reposição de água no solo foram diferentes da lâmina de reposição integral.
2. Não foram observadas diferenças significativas entre as médias de produtividade, para as diferentes épocas de suspensão da irrigação.
3. Lâminas deficitárias favoreceram o aumento do número e o peso de grãos não colhidos; já lâminas maiores que a reposição integral favoreceram o aumento do número de vagens verdes.
4. A eficiência do uso da água foi inversamente proporcional aos níveis de reposição de água no solo.
5. Os valores de Kc foram diferentes dos diversos autores pesquisados, o que determina a importância de obtenção em cada região de estudo. As fases em que foram verificadas maiores valores de Kc foram R6 e R8.
6. O maior lucro foi encontrado quando irrigou-se até R9+14, com lâmina ótima econômica de 576,84 mm, correspondendo a 92,37% da lâmina ótima física, que foi estimada em função das lâminas aplicadas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. F. B.; RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B.; MARTINS, L. A. Progresso do melhoramento genético do feijoeiro nas décadas de setenta e oitenta nas regiões Sul e Alto Paranaíba em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 1, p. 105-112, jan. 1994.

AGRIANUAL 2006 – **Anuário da Agricultura Brasileira**. São Paulo: FNP consultoria e comércio, 2006. 520 p.

ALVINO, A.; TEDESCHI, P.; ZERBI, G. Growth, flowering, Citing and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as influenced by water regime, P fertilization and treatments. **Acta Horticulturae**, Amsterdam, v. 228, p. 219-226, 1988.

ANDRADE, C. L. T.; COELHO, E. F.; COUTO, L.; SILVA, E. L. Parâmetros de solo-água para engenharia de irrigação e ambiental, Poços de Caldas-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas. **Resumos...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 1-39.

ANTUNES, R. C. B.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C.; RENA, A. B.; ALVARENGA, A. P. Determinação da evapotranspiração da cultura do cafeeiro em formação, Brasília-DF. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 2000, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos...** Brasília: EMBRAPA Café, 2000. v. 2, p. 810.

ARAÚJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. de O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFÓS, 1996.

AZEVEDO, H. J. **Efeito de diferentes lâminas de água e doses de adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1984. 85 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

BERGAMASCHI, H. Deficiência hídrica do feijoeiro: análise de crescimento e fenologia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 7, p. 733-743, jul. 1988.

BERGAMASCHI, H. Deficiência hídrica do feijoeiro: 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. 3, p. 387-392, mar. 1989.

BERNARDO, S.; GALVÃO, J. D.; GUERINI, H.; CARVALHO, J. B. Efeito dos níveis de água no solo sobre a produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Seiva**, Viçosa, v. 30, n. 71, p. 7-13, out./dez. 1970.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1996. 596 p.

BRASIL. PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO. **Tempo de irrigar**: manual do irrigante. São Paulo: Mater, 1987.

CABELLO, F. P. **Riegos Localizados de alta Freqüência (RLAF) Goteo, microaspersion, exudacion**. 3. ed. Barcelona: Ediciones Mundi Prensa, 1996. 513 p.

CAIXETA, T. J.; MARINATO, R.; FRANÇA-DANTAS, M. S. Efeito da aplicação de quatro lâminas totais de água e três níveis de fertilizantes no rendimento do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). In: EPAMIG. **Projeto feijão**: relatório 73/75. Belo Horizonte, 1978. p. 27-29.

CARVALHO, A. M. **Efeitos de diferentes lâminas de água e formas de parcelamento de nitrogênio em cobertura, via fertirrigação, no rendimento de grãos da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Carioca**. 1992. 94 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CARVALHO, J. A. **Coefficiente de cultura, avaliação econômica da produção e análise do crescimento da cenoura (*Daucus carota* L.) irrigada**. 1995. 77 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CARVALHO, A. J. **Desempenho técnico-econômico de sistemas intercalares do feijoeiro-comum em lavouras de café (*Coffea arabica*) adensado**. 2005. 187 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CARVALHO, J. A.; REIS, J. B. R. S. Avaliação dos custos de energia de bombeamento e determinação do diâmetro econômico da tubulação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 441-449, abr./jun. 2000.

CARVALHO, L. G.; SAMPAIO, S. C.; SILVA, A. M. Determinação da condutividade hidráulica “*in situ*” de um latossolo roxo distrófico. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 7, p. 1-97, 1996

CHAGAS, J. M.; BRAGA, J. M.; VIEIRA, C.; SALGADO, L. T.; JUNQUEIRA NETO, A.; ARAÚJO, G. A. A.; ANDRADE, M. J. B.; LANA, R. M. Q.; RIBEIRO, A. C. Recomendação adubação para o feijão. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999. p. 306-308.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Histórico safras de grãos**. Brasília, 2006. Disponível em: <<https://www.conab.gov>>. Acesso em: 20 out. 2006.

CPA/Unicamp. **Zoneamento climático da cultura do café. Normais climatológicas**. Campinas, 2006. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br>>. Acesso em: 20 nov. 2006.

CULTIVAR de feijão Talismã. Sete Lagoas: UFLA/UFV/EMBRAPA/EPAMIG, 2002. Folder.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (FAO, Estudos de irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO. 1979. 193 p. (Tecnical note, 33).

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPANS, J. W.; PARLANGE, M. B. **Programa SWRC** (Version 1. 00): Soil-Water Retention Curve (Software). Piracicaba: ESALQ; Davis: University of Califórnia, 1995. 2 disquetes.

ENCARNAÇÃO, C. R. F. **Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Goiano Precoce**. 1980. 62 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

FANCELLI, A. L. **Cultura do feijão**. Piracicaba: FEALQ, 1987. 138 p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Tecnologia da produção do feijão irrigado**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997. 158 p.

FELIPE, M. P. **Efeitos de diferentes lâminas de água e épocas de parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1991. 105 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

FERGUSON, C. E. **Teoria micro-econômica**. 11. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1988. 609 p.

FERREIRA, D. F. **Sisvar**. Versão 4. 3. Lavras: UFLA/DEX, 1999. 4 disquetes.

FIGUEREDO, S. F. **Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro**. 1998. 94 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação**. 1986. 133 p. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

FRIZZONE, J. A.; OLLITA, A. F. L.; PEREIRA, G. T. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso do nitrogênio e lâmina de irrigação. Região de produção racional. **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 28, p. 26-32, mar. 1987.

GARRIDO, M. A. T. **Respostas do feijoeiro às lâminas de água e adubação nitrogenada**. 1998. 205 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GARRIDO, M. A. T.; PURCINO, J. R. C.; LIMA, C. A. S. Efeito do déficit de água em alguns períodos do ciclo de crescimento sobre o rendimento do feijoeiro. In: EMPRESA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto Feijão: relatório 77/78**, Belo Horizonte, 1979. p. 25.

GARRIDO, M. A. T.; TEIXEIRA, H. A. Efeito de diferentes níveis de umidade do solo sobre o rendimento do feijoeiro comum, na região do Sul de Minas Gerais. In: EMPRESA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto Feijão: relatório 76/77**, Belo Horizonte, 1978. p. 24.

GUANDIQUE, M. E. G. **Balanço hídrico no solo e consumo de água pela cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. 1993. 94 p. Dissertação

(Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

GUIMARÃES, C. M. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p. 157-174.

KRAMER, P. J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. 489 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, 1999. 497 p.

LIBARDI, V. C. M. **Efeitos de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro**. 1996. 49 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

LOPES, N. F. Crescimento e conversão da energia solar em *Phaseolus vulgaris* L. submetido a três densidades de fluxo radiante e dois regimes hídricos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 33, n. 186, p. 142-164, mar./abr. 1986.

LOPES, N. F.; OLIVA, M. A.; GOMES, M. M. S.; SOUZA, V. F.; CARDOSO, M. J. Crescimento, morfologia, partição de assimilados e produção de matéria seca do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido a três densidades do fluxo radiante e dois regimes hídricos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 34, n. 192, p. 110-124, mar./abr. 1987.

LUCHIARI, A. **Determinação do coeficiente de cultura (Kc) para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pelo método do balanço hídrico**. 1978. 59 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

MACHADO, P. B. **Efeito de diferentes lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1988. 43 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MAGALHÃES, A. A.; MILLAR, A. A.; CHOUDHURY, E. N. Efeito do déficit fenológico de água sobre a produção de feijão. **Turrialba**, San Jose, v. 29, n. 4, p. 269-273, oct./dic. 1979.

MANTOVANI, E. C. **Determinação do coeficiente de cultura para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado em duas épocas de plantio.** 1986. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MILLAR, A. A.; CHOUDHURY, E. N. A model to define operational irrigation frequency for maximum crop yield of crops. **Turrialba**, San Jose, v. 30, n. 4, p. 391-398, oct./dic. 1980.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

OLIVEIRA, M. S. **Efeito do déficit hídrico aplicado em diferentes fases do ciclo fenológico do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Eriparza.** 1987. 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OLIVEIRA, P. M. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.).** 2003. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OLIVEIRA, S. L. **Função de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio.** 1993. 91p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PAVANI, L. C. **Evapotranspiração e produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) sob três níveis de potencial da água no solo.** 1985. 171 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

PELOSO, M. J.; SILVEIRA, P. M.; SILVA, C. C.; MOREIRA, J. A. A. Cultivo irrigado em terras altas. In: ARAÚJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil.** Piracicaba: POTAFÓS, 1996. p. 571-588.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C.

Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, J. R. D. **Viabilidade técnica e econômica das aplicações de água e nitrogênio no cultivo de gladiolo (*Gladiolus x grandiflorus* L.).** 2005. 80 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PINTO, J. M. **Efeito de diferentes regimes hídricos no solo sobre a produção e os componentes da produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1985. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

POWER, J. F. Role of moisture stress in plant nutritional functions. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 453-474.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; SANTOS, J. M. **An analysis of soil-water movement in the field: II. Water balance in a snap bean crop**. Piracicaba: CENA/ESALQ. 1974. 19 p. (Boletim científico, 22).

REICHARDT, K. **Processos de transferências no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 466 p.

RESENDE, M.; MENDERSON, O. W.; FERRERES, E. Freqüência de irrigação, desenvolvimento e produção do feijão Kidney. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n. 3, p. 363-370, maio/jun. 1981.

REZENDE, R. **Efeito da qualidade da irrigação em variáveis de produção e de crescimento da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2000. 88 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SAAD, A. M.; DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. Controle de irrigação pelo método do tensiômetro na cultura do feijão sob pivô central. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Feijão irrigado**. 3. ed. Piracicaba: ESALQ, 1992. 177 p.

SEDIYAMA, C. G.; RIBEIRO, A.; LEAL, B. G. Relações clima-água-planta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas. **Resumos...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p. 46-85.

SILVA, E. L. **Suscetibilidade do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) Cv. Goiano precoce a inundações temporárias do sistema radicular em diferentes fases do seu ciclo vegetativo**. 1982. 76 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. **Irrigação do feijoeiro**. Goiânia: EMBRAPA/CNPAP, 2001. 230 p.

STANSEL, J. R.; SMITTLE, D. A. Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of the American Society of Horticultural Science**, Alexandria, v. 105, n. 6, p. 869-873, Nov./Dec. 1980.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 835-841, Apr. 2000.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. **Irrigação do feijoeiro**. Goiânia: EMBRAPA/CNPAP, 1986. 31 p. (EMBRAPA/CNPAP. Circular Técnica, 20).

STONE, L. F.; SILVA, S. C. **Uso do tanque classe A no controle da irrigação do feijoeiro no sistema plantio direto**. Goiânia: EMBRAPA/CNPAP, 1999. 2 p (Pesquisa em Foco, 25).

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 4, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

VIEIRA, E. H. N. **Sementes de feijão: produção e tecnologia**. Goiânia: EMBRAPA/CNPAP, 2000. 270 p.

YOKOYAMA, L. P.; BANNO, K.; KLUTHCOUSKI, J. Aspectos socioeconômicos da cultura. In: ARAÚJO, R. S. et al. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 1996. p. 1-21.