



JOSÉ ANTONIO DO VALE SANT'ANA

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, COEFICIENTE DE
CULTURA E PRODUTIVIDADE DE CAFEIEIRO
FERTIRRIGADO**

LAVRAS – MG

2015

JOSÉ ANTONIO DO VALE SANT'ANA

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, COEFICIENTE DE CULTURA E
PRODUTIVIDADE DE CAFEIEIRO FERTIRRIGADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Alberto Colombo

Coorientador

Dr. Luiz Fernando C. de Oliveira

LAVRAS - MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Sant'Ana, José Antonio do Vale.

Índice de área foliar, coeficiente de cultura e produtividade de
cafeeiro fertirrigado / José Antonio do Vale Sant'Ana. – Lavras :
UFLA, 2015.

144 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2015.

Orientador: Alberto Colombo.

Bibliografia.

1. *Coffea arabica* L. 2. Adubação. 3. Irrigação. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

JOSÉ ANTONIO DO VALE SANT'ANA

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, COEFICIENTE DE CULTURA E
PRODUTIVIDADE DE CAFEIEIRO FERTIRRIGADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 06 de fevereiro de 2015.

Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Dra. Gleice Aparecida de Assis	UFU
Dra. Myriane Stella Scalco	UFLA
Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães	EPAMIG

Dr. Alberto Colombo
Orientador

Dr. Luiz Fernando C. de Oliveira
Coorientador

LAVRAS - MG

2015

Aos meus pais: Juvenal Casseiro de Sant'Ana (*in memoriam*) e Regina de Jesus do Vale.

Aos meus irmãos, primos e sobrinhos, pela amizade e carinho.

À minha amada Beatriz, pelo incentivo apoio e carinho.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente e iluminando os meus caminhos, por todas as bênçãos e realizações concedidas.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do curso.

Agradeço ao apoio da Fundação de Apoio à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG, e ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D/Café, pelo financiamento do projeto, ao CNPq pela bolsa concedida, e à CAPES, pela concessão da minha bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Alberto Colombo, pela amizade, ensinamentos e principalmente pela confiança depositada.

Ao Núcleo de Estudos em Cafeicultura (NECAF), pela concessão da estrutura física e humana na execução do trabalho, e à Dr^a. Myriane S. Scalco, por todo apoio concedido durante esses quatro anos.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando C. de Oliveira, pela coorientação, convivência, confiança e amizade.

Aos funcionários Zé Luís e Neném, do Laboratório de Hidráulica do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela cooperação.

A todos que atuaram no desenvolvimento deste trabalho no campo e no laboratório, em especial à Adriele, Alexandre, Gleice, Iraci, João Paulo e Renato pela cooperação.

A todos os meus amigos de Lavras, em especial aos meus amigos de República, Thiago, Álvaro, André, Antônio, Paulo, Julian e João (associado), e à Dona Vilma, pela convivência e amizade.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo monitorar evolução do índice de área foliar, do coeficiente de cultura único (Kc) e da produtividade média do cafeeiro arábica e da concentração dos íons NO_3^- e K^+ no extrato saturado do solo de lavouras irrigadas de café em função de diferentes doses e formas de parcelamento da adubação nitrogenada e potássica. Estes parâmetros foram avaliados em parcelas recebendo cinco doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230% da recomendação de N e K_2O para a cultura do café não irrigado em Minas Gerais), em duas formas de parcelamento (quatro aplicações em Nov., Dez., Jan. e Fev. e doze aplicações mensais). O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Lavras, em Lavras MG, com cafeeiros da variedade Catiguá MG-3, que foram plantados, em maio de 2007, no espaçamento de 2,5 x 0,6 metros. As fontes de N e K_2O utilizadas foram: ureia pecuária (45% de N) e nitrato de potássio (13% de N e 44% de K_2O). A evolução temporal do índice de área foliar do cafeeiro ajustou-se bem ao modelo Logístico e ao modelo de Gompertz. O índice de área foliar e a produtividade média, das safras de 2010, 2011, 2012 e 2013, não foram influenciados pelas formas de parcelamentos (quatro e doze aplicações/ano). O modelo de Mitscherlich foi o que melhor descreveu a relação entre a produtividade média do cafeeiro e as doses da adubação nitrogenada e potássica. Doses de adubação nitrogenada e potássica menores que 80% do recomendado para plantas não irrigadas restringiram o crescimento e a produtividade do cafeeiro em lavouras irrigadas. Ao longo deste estudo, o cafeeiro arábica, cultivar Catiguá MG-3, irrigado por gotejamento, apresentou valores Kc variando entre 0,21 e 0,80, com um valor médio de 0,57. No geral, ao longo do período avaliado. O monitoramento das concentrações de NO_3^- e K^+ no extrato saturado indicou uma grande variabilidade, no entanto, no parcelamento com 12 aplicações anuais, foi observada uma maior estabilidade temporal. No parcelamento com quatro aplicações anuais, no período das chuvas, ocorreu maior lixiviação de NO_3^- e K^+ .

Palavras-chave: *Coffea arábica* L. Adubação. Irrigação.

ABSTRACT

This study aimed at monitoring the time evolution of coffee plant leaf area index; of coffee plant single crop coefficient (Kc); of average coffee bean yield evolution; and of NO_3^- and K^+ ions concentration at the saturated soil extract on irrigated coffee plantations subjected to different splitting applications strategies of different nitrogen and potassium fertilization rates. Five application rates (30%, 80%, 130%, 180% and 230% of the recommended amount of N and K_2O for non-irrigated coffee plants growing in the Minas Gerais region), and two splitting application strategies (four applications on Nov, Dec, Jan and Feb, and 12 monthly applications) were evaluated. The experiment was conducted at an experimental area of the Universidade Federal de Lavras, in Lavras, Minas Gerais, where coffee plants, Catiguá MG-3 cv, were transplanted on May 2007, in a 2.5 x 0.6 meters spacing. Livestock urea (45% N) and potassium nitrate (13% N and 44% K_2O) were used as sources of N and K_2O . The Logistic and Gompertz models showed good adjustments on describing the time evolution of coffee leaf area index. The time evolution of coffee plant leaf area index and the time evolution of average coffee bean yield, for the 2010, 2011, 2012, and 2013 harvests, were not affected by the two evaluated splitting application strategies. The relationship among average coffee bean yield and nitrogen and potassium fertilizer rates was best described by the Mistcherlich model. Restrictions on both coffee plants growth and coffee bean yield were observed on the plots receiving potassium and nitrogen fertilizer rates lower than 80% of the recommended amount. The single crop coefficient for the drip irrigated Catiguá MG-3 cv. coffee plots ranged from a minimum value of 0.21 to a maximum value of 0.80, with an average Kc value of 0.57. In a general way, the time evolution of NO_3^- and K^+ ions concentration in the saturated soil extract showed a high variability in time, although, under the 12 monthly applications splitting application strategy a greater temporal stability was observed. Higher levels of NO_3^- and K^+ leaching were observed on the plots receiving only four applications of nitrogen and potassium fertilizers.

Keywords: *Coffea arabica* L. Fertilization. Irrigation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Sequência de ilustrações apresentando detalhes do sistema de irrigação utilizado no experimento: (a₁) sucção afogada de 1 ¼"; (a₂) moto-bomba centrífuga de 3 cv; (a₃) registro de gaveta de 1"; (a₄) manômetro; (a₅) válvula de retenção 1"; (b) filtro de Areia de 16"; (c) filtro de disco 1 ½"; (d) tubos de PVC azul DN 50 e PN 40 (linha principal); (e) tubos e registros na linhas de derivação que conduzia a água até as linhas laterais das três repetições de cada nível de adubação; (f) individualização dos cinco níveis de adubação por meio de registros nas linhas de derivação de umas das áreas do experimento; (g) distribuição das linhas laterais; (h₁) linhas laterais com tubo flexível de polietileno de 16 mm, PN 40 e (h₂) gotejadores Katiff autocompensantes, vazão de 3,75 L h⁻¹46
- Figura 2 Sequência de ilustrações apresentando detalhes dos tensiômetro (a₁) com vacuômetro digital ou tensímetro de punção digital (a₂) utilizado no experimento; (b) verificação do nível da coluna de água dentro dos tensiômetros; (c) ajuste na leitura do tensímetro para obtenção do valor zero quando o aparelho não estiver sob tensão de água no solo e (d) leitura da tensão de água no solo (bar), Lavras-MG. UFLA, 201547

Figura 3 Sequência de ilustrações apresentando detalhes da coleta de solução: (a₁) bomba de vácuo manual; (a₂) presilha que era fixada na magueira flexível do extrator, impedindo a perda da sucção pela parte superior do extrator; (a₃) extrator de solução entre dois tensiômetros; (b) detalhes da distribuição dos extratores de solução no campo; (c) retirada da solução do solo com auxílio de uma seringa e (d) recipientes em que foram colocadas as soluções após a coleta de solução no campo51

LISTAS DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 Temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa média mensal do ar (%), entre maio de 2007 e agosto de 2013, da estação meteorológica na área experimental. UFLA, Lavras-MG, 201574
- Gráfico 2 Precipitação pluvial média (mm d^{-1}) e irrigação anual acumulada (mm), entre maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.....76
- Gráfico 3 Velocidade média mensal de vento (m s^{-1}) a 2,0 m acima da superfície do solo e evapotranspiração mensal de referência (mm d^{-1}), estimada pela equação de Penman-Monteith/FAO, em Lavras, entre maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.....77
- Gráfico 4 Valores médios da Radiação solar (R_s), em W m^{-2} e Radiação solar estimada (R_{so}), em W m^{-2} , na cidade de Lavras, entre maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras-MG, 201578
- Gráfico 5 Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade de 0,50 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 201582

Gráfico 6	Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade de 0,90 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015	83
Gráfico 7	Concentração média de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidades 0,50 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	85
Gráfico 8	Concentração média de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidades 0,90 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	86
Gráfico 9	Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade de 0,50 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015	91
Gráfico 10	Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade de 0,90 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015	92

Gráfico 11	Concentração média de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidades 0,50 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	95
Gráfico 12	Concentração média de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidades 0,90 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	96
Gráfico 13	Médias dos valores de índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) da última avaliação de crescimento (Jun/2013) para cafeeiros fertirrigados em duas formas de parcelamentos de adução (P4 e P12), sob diferentes níveis de adubação (30, 80, 130, 180 e 230%). UFLA, Lavras-MG, 2015.....	104
Gráfico 14	Tensão de água no solo nas profundidades de 0,10; 0,25; 0,40 e 0,60 m entre o mês de maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras -MG, 2015.....	107
Gráfico 15	Equações de ajuste para altura de planta (a), em m, e diâmetro de copa (b), em m, de cafeeiros irrigados em função das épocas de avaliações, em DAP. UFLA, Lavras - MG, 2015	109

Gráfico 16	Curvas das estimativas de GDD ajustadas em função dos dias após o plantio DAP, para a cultivar Catiguá MG-3, usando o método de determinação de GDD residual (ARNOLD, 1959; DUFAULT, 1997; OMETTO, 1981; SNYDER, 1985) com temperatura base inferior (Tb) de 12,9°C e temperatura base superior (TB) de 32,4°C, nas condições climáticas de Lavras-MG, entre maio de 2007 e até agosto de 2013. UFLA, Lavras - MG, 2015	110
Gráfico 17	Equação de ajuste para Índice de área foliar (IAF) em função dos graus- dia de desenvolvimento para cafeeiro, cultivar Catiguá MG-3, no intervalo entre 1545 a 17576 GDD. UFLA, Lavras - MG, 2015.....	111
Gráfico 18	Coeficiente de cultivo (Kc) em função do índice de área foliar de cafeeiros arábicas. UFLA, Lavras - MG, 2015	114
Gráfico 19	Coeficiente de cultivo em função do Índice de área foliar comparados aos resultados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994) e Pereira, Camargo e Villa Nova (2011). UFLA, Lavras - MG, 2015	115
Gráfico 20	Coeficiente de cultivo (Kc) em função do Índice de área foliar de cafeeiros arábica, irrigados por gotejamento, considerando os dados observados nesse experimento e os resultados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994). UFLA, Lavras - MG, 2015	117
Gráfico 21	Curvas de resposta dos dados médios de quatro anos de produção (scs ha ⁻¹) de café beneficiado submetida a diferentes níveis de adubação, ajustadas aos valores observados (pontos na cor preta cheia (P4) e branco (P12)) segundo os modelos: polinômio do segundo grau (linha tracejada) e Mitscherlich (linha cheia). UFLA, Lavras - MG, 2015.....	122

Gráfico 22	Derivada das curvas de resposta de produtividade versus porcentagem do nível de adubação recomendado de N e K. UFLA, Lavras - MG, 2015.....	123
Gráfico 23	Produtividade relativa prevista pelos modelos Mitscherlich e polinomial do segundo grau. UFLA, Lavras - MG, 2015	125
Gráfico 24	Recomendação de adubação N+K em função do custo equivalente por hectare para atender 100% da recomendação de adubação de N+K expressa em número de sacas beneficiadas, de acordo com os modelos: Mitscherlich (a).e polinomial do segundo grau (b). UFLA, Lavras - MG, 2015	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Atributos físicos do solo da área experimental em três camadas do solo e sua classificação textural, Lavras-MG. UFLA, 2015.....	41
Tabela 2	Atributos químicos do solo da área experimental referente a camada de 0-0,2 m, Lavras-MG. UFLA, 2015.....	42
Tabela 3	Teores médios de K e P encontrados no solo (camada de 0 - 0,2 m), teor foliar e quantidades totais das duas fontes de fertilizantes para 100% da dose recomendada para o cafeeiro em sequeiro na fase de produção no ano de 2010, 2011, 2012 e 2013, Lavras-MG. UFLA, 2015.....	44
Tabela 4	Curvas de retenção para diferentes camadas do solo do local de estudo segundo o modelo de Genuchten (1980), Lavras-MG. UFLA, 2015.....	49
Tabela 5	Valores observados de Kc para cafeeiro arábica sob irrigação por gotejamento na região Sul de Minas Gerais obtidos entre os meses de agosto de 2007 e agosto de 2013, Lavras-MG. UFLA, 2015.....	59
Tabela 6	Valores mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados médios de nitrato (NO_3^-), em mg L^{-1} , obtidos bimestralmente entre setembro de 2010 e abril de 2013, amostrados na profundidade de 0,50 m e 0,90 m, sob duas formas de adubações, quatro e doze aplicações de fertilizantes. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	80

Tabela 7	Valores mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados médios de potássio (K^+), em $mg L^{-1}$, obtidos bimestralmente entre setembro de 2010 e abril de 2013, amostrados na profundidade de 0,50 m e 0,90 m, sob duas formas de adubações, quatro e doze aplicações de fertilizantes. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	89
Tabela 8	Análise de variância para o índice de área foliar do cafeeiro, cultivar ‘Catiguá MG-3’, avaliado em duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com diferentes níveis de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%) ao longo do tempo (entre janeiro de 2010 e abril de 2013). UFLA, Lavras-MG, 2015	97
Tabela 9	Análise de variância referente ao desdobramento das épocas de avaliação dentro de cada combinação das formas de parcelamentos (P4 e P12) com os diferentes níveis de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%), apresentando os números de graus de liberdade (GL), os valores dos quadrados médios (QM) para o índice de área foliar do cafeeiro, cultivar ‘Catiguá MG-3’, considerando os ajustes do modelo Logístico e Gompertz. UFLA, Lavras-MG, 2015.....	99
Tabela 10	Parâmetros dos modelos Logístico e Gompertz, e os indicadores, RMSE, E e R^2 , para as duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com os diferentes níveis de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%) definidos a partir dos dados observado ao longo do tempo (entre janeiro de 2010 e abril de 2013). UFLA, Lavras-MG, 2015.....	100

Tabela 11	Descrição matemática do Kc em função do Índice de área foliar. Valores ajustados dos parâmetros dos modelos linear, polinomial do segundo grau, Logístico e Gompertz, e os indicadores de qualidade de ajuste, RMSE, E_f e R^2	113
Tabela 12	Produtividade de café beneficiado (2010, 2011, 2012 e 2013), cultivar ‘Catiguá MG-3’, avaliado em duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com diferentes doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%). UFLA, Lavras - MG, 2015 .	119
Tabela 13	Análise de variância da produtividade média de quatro safras de café beneficiado (2010, 2011, 2012 e 2013), cultivar ‘Catiguá MG-3’, avaliado em duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com diferentes doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%). UFLA, Lavras - MG, 2015.....	120
Tabela 14	Valores ajustados dos parâmetros dos modelos Mitcherlich e polinomial do segundo grau, e os indicadores de qualidade de ajuste, RMSE, E e R^2 . UFLA, Lavras - MG, 2015	121
Tabela 15	Valores ajustados dos parâmetros dos modelos de produtividade adimensional de Mitcherlich e do polinômio do segundo grau. UFLA, Lavras - MG, 2015.....	124

Tabela 16 Valores dos custos médios dos fertilizantes (C_{NK100}), da saca de café beneficiado (Ps), do Custo equivalente por hectare (incluindo aquisição e aplicação) para atender 100% da recomendação de adubação de N +K (S_{NK100}), da fração da receita bruta comprometida com o custo da aplicação de 100% da recomendação de adubação de N+K (F_{NK100}) e o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada N+K para os modelos Mitcherlich (XO_M) e polinomial do segundo grau (XO_P) entre os anos de 2010 e 2013. UFLA, Lavras - MG, 2015 129

LISTA DE SÍMBOLOS

AF	Área foliar do dossel (AF em m ² por planta);
a _G , b _G e c _G	Parâmetros de ajuste do modelo de Gompertz para o índice de área foliar (IAF);
a _{Go} , b _{Go} e c _{Go}	Parâmetros de ajuste do modelo de Gompertz para o coeficiente de cultura (Kc);
a _j , b _j e c _j	Parâmetros de ajuste do modelo de Mitscherlich para IAF;
a _L , b _L e c _L	Parâmetros de ajuste do modelo Logístico para IAF;
a _{LD} , b _{LD} e c _{LD}	Parâmetros de ajuste do modelo logístico para diâmetro de copa;
a _{Lh} , b _{Lh} e c _{Lh}	Parâmetros de ajuste do modelo logístico para altura de plantas;
a _{li} e b _{li}	Parâmetros de ajuste da equação linear para o Kc;
a _{Lo} , b _{Lo} e c _{Lo}	Parâmetros de ajuste do modelo Logístico para o Kc;
a _M , b _M e c _M	Parâmetros de ajuste do modelo de Mitscherlich para produtividade;
a _p , b _p e c _p	Parâmetros de ajuste do polinômio para produtividade;
a _{Po} , b _{Po} e c _{Po}	Parâmetros de ajuste da equação polinomial para o Kc;
C _n e C _d	Constantes que dependem da cultura de referência e do período de tempo do cálculo da evapotranspiração de referência padrão FAO (ET ₀);
C _{NK100}	Custo por hectare (incluindo aquisição e aplicação) para atender a recomendação de adubação de N e K (R\$ ha ⁻¹);
c _p	Calor específico do ar a pressão atmosférica constante (MJ kg ⁻¹ °C ⁻¹);
d	Plano zero, altura de deslocamento (m);
DC	Diâmetro de copa (m) do cafeeiro;

DP	Distância entre planta do cafeeiro (m);
ea	Pressão parcial do vapor (kPa);
E_f	Eficiência do modelo;
E_i	Valor estimado;
es	Pressão de saturação do vapor d'água (kPa);
ET_0	Evapotranspiração referência (mm);
ET_c	Evapotranspiração da cultura (mm),
F_{NK100}	Fração da receita bruta comprometida com o custo da aplicação de 100% da recomendação de adubação de N+K;
G	Fluxo de calor sensível no solo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$);
GDD	Graus-dias de desenvolvimento;
H	Altura do cafeeiro (m);
h	Potencial matricial (cm.c.a);
i	Índice para identificação do modelo matemático de produção considerado: $i = P =$ polinômio do segundo grau, $i = M =$ Mitscherlich;
I	Irrigação (mm);
IAF	Índice de área foliar ativo, iluminado pelo sol ($m^2\ m^{-2}$);
K	Constante de von Kármán ($k = 0,41$);
K_c	Coefficiente de cultura do cafeeiro;
$K_{c_{Go}}$	Valores de K_c (adimensional) previsto pelo modelo de Gompertz;
$K_{c_{li}}$	Valores de K_c (adimensional) previsto pelo modelo linear;
$K_{c_{Lo}}$	Valores de K_c (adimensional) previsto pelo modelo Logístico;
$K_{c_{Po}}$	Valores de K_c (adimensional) previsto pelo modelo polinomial;

m e n	Parâmetros de ajuste da equação de Genuchten (1980), adimensionais;
$M_{11\%}$	Massa de café beneficiado padronizada para a umidade de 11% (kg);
MCB_i	Margem de contribuição bruta (R\$ ha ⁻¹);
M_P	Massa de café beneficiado da amostra de 10L de café de pano (kg);
M_{UB}	Massa de café beneficiado com umidade UB (kg);
MV	Massa de café de chão (Varrição) beneficiada sob a saia de 10 plantas (kg);
n	Número de dados;
N_p	Número de plantas por hectare;
\bar{O}	Média do valor estimado;
O_i	Valor observado;
P_4	Adubações parceladas em quatro aplicações ao ano;
P_{12}	Adubações parceladas em doze aplicações ao ano;
$PPM_{coletada}$	Concentração lida na solução extraída da cápsula porosa (ppm);
PPM_{sat}	Concentração do extrato saturado do solo (ppm);
P_S	Preço recebido pela venda de uma saca de café beneficiada (R\$ sc ⁻¹);
R_a	Radiação solar recebida ao topo da atmosfera da terra (radiação extraterrestre), em MJ m ⁻² d ⁻¹ ;
r_a	Resistência aerodinâmica da cultura (s m ⁻¹);
r_l	Resistência dos estômatos da folha bem iluminada (s m ⁻¹);
R^2	Coefficiente de determinação;
$RMSE$	Raiz quadrada da média dos erros;

Rn	Saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);
rs	Resistência da superfície (s m^{-1});
R _{SO}	Radiação solar de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);
S _{NK100}	Custo equivalente por hectare (incluindo aquisição e aplicação) para atender 100% da recomendação de adubação de N +K (sc ha^{-1});
T	Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);
t	Tempo, em dias, transcorrido desde o plantio das mudas no campo (DAP);
U ₂	Velocidade do vento a 2 m (m s^{-1});
UB	Teor de umidade do café beneficiado (%);
U _z	Velocidade do vento a altura z (m s^{-1});
VP	Volume de café do pano colhido em 8 plantas (L);
x	Porcentagem dos níveis de adubação recomendada de K e N (%);
x _{OM}	Valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K referente ao modelo de Mitscherlich (%);
x _{Op}	Valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K, referente ao modelo polinomial de produtividade (%);
y ₄	Teor de nitrato ou potássio para a adubação parcelada em quatro aplicações no ano;
y ₁₂	Teor de nitrato ou potássio para a adubação parcelada em doze aplicações no ano;
Y	Produtividade em cada tratamento (sc ha^{-1});
Y _G	Valores médios de IAF ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) estimados pelo modelo Gompertz;

Y_{IAF}	Valores médios de IAF ($m^2 m^{-2}$) estimados pelo modelo de Mitscherlich;
Y_L	Valores médios de IAF ($m^2 m^{-2}$) estimados pelo modelo Logístico;
Y_{LD}	Valores médios de diâmetro de copa (m) estimados pelo modelo logístico;
Y_{Lh}	Valores médios de altura de plantas (m) estimados pelo modelo logístico;
Y_M	Produtividade prevista pelo modelo de Mitscherlich ($sc ha^{-1}$);
Y_{max}	Produtividade máxima que seria atingida por uma lavoura livre de restrições de adubação ($sc ha^{-1}$);
Y_{mM}	Produtividade máxima prevista pelo modelo de Mitscherlich, ($sc ha^{-1}$);
Y_{mP}	Produtividade máxima prevista pelo modelo polinomial ($sc ha^{-1}$);
Y_P	Produtividade prevista pelo modelo polinomial ($sc ha^{-1}$);
Y_{r_i}	Produtividade relativa correspondente à porcentagem aplicada da recomendação de N e K;
Y_{r_M}	Produtividade relativa do modelo de Mitscherlich;
Y_{r_P}	Produtividade relativa do modelo polinomial do segundo grau;
z	Altitude, em m;
Z_h	Altura de medida de umidade (m);
z_m	Altura de medida do vento (m);
Z_{oh}	Comprimento da rugosidade transferência de domínio de calor e vapor (m);
Z_{om}	Comprimento da rugosidade transferência de domínio do momentum (m);

θ	Umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);
Θ_A	Umidade no solo no momento da extração da amostra ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);
θ_R	Umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);
Θ_S	Umidade de saturação do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);
α	Parâmetro de ajuste (cm.c.a^{-1} , representa o inverso da sucção mínima necessária para o início da remoção de água dos macroporos);
γ	Coefficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
ΔA	Variação de armazenamento (mm);
Δt	Intervalo entre irrigações sucessivas em que não houve precipitação, em dias (d);
λ_{ET}	Fluxo de calor latente (evapotranspiração) ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);
ρ_a	Densidade do ar (kg m^{-3});
ΣC_v	Somatória dos demais custos variáveis de produção não relacionados à adubação de N+K ($\text{R\$ ha}^{-1}$).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	A cafeicultura: considerações gerais	29
2.2	Irrigação na cafeicultura	30
2.3	Irrigação por gotejamento na cafeicultura	31
2.4	Adubação no cafeeiro fertirrigado	32
2.5	Nitrogênio (N) e potássio(K) no solo cultivado com cafeeiro	35
2.6	Graus-dia de desenvolvimento (GDD)	36
2.7	Coefficiente de cultura (Kc) do cafeeiro	37
2.8	Modelos matemáticos na descrição do crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro	39
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	Localização e caracterização da área experimental	41
3.2	Instalação e condução do experimento	42
3.3	Delineamento experimental	45
3.4	Sistema de irrigação	45
3.5	Manejo de irrigação	47
3.6	Graus-dia de desenvolvimento (GDD)	50
3.7	Avaliações	50
3.7.1	Monitoramento de nutrientes no extrato saturado do solo (NO_3^- e K^+)	50
3.7.2	Índice de área foliar (IAF)	53
3.7.3	Coefficiente de cultura simples (Kc) para cafeeiro arábica	54
3.7.4	Produtividade de café beneficiado (sc ha^{-1})	61
3.8	Análises	62
3.8.1	Monitoramento de nutrientes no extrato saturado do solo (NO_3^- e K^+)	62
3.8.2	Índice de área foliar (IAF)	63
3.8.3	Coefficiente de cultura simples (Kc) para cafeeiro arábica	65
3.8.4	Produtividade de café beneficiado (sc ha^{-1})	66
3.8.4.1	Análise econômica da função de produção	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	Elementos meteorológicos	74
4.2	Monitoramento de nitrato no extrato saturado do solo (NO_3^-)	79
4.3	Monitoramento de Potássio no extrato saturado do solo (K^+)	87
4.4	Índice de área foliar (IAF)	97
4.5	Coefficiente de cultura único (Kc)	105
4.6	Produtividade do cafeeiro	118
5	CONCLUSÕES	132
	REFERÊNCIAS	134

1 INTRODUÇÃO

A irrigação e a fertirrigação são técnicas modernas na condução de lavouras cafeeiras, que contribuem para elevar a produtividade em áreas onde o déficit hídrico é fator limitante, e mesmo em áreas onde este não existe, suprime os possíveis riscos de períodos de veranicos durante o ciclo da cultura, principalmente na fase crítica do enchimento dos grãos.

Segundo Coelho e Silva (2005) a fertirrigação oferece inúmeras vantagens em comparação com os métodos convencionais de aplicação de fertilizantes. Dentre as principais vantagens pode-se destacar a redução no uso de mão de obra, menor exigência de equipamentos, menor gasto com energia, eficiência de uso da água e dos nutrientes; proporciona ainda a colocação simultânea de soluções de nutrientes diretamente na zona radicular, na forma e na quantidade requerida, distribuída e parcelada no perfil do solo, conforme a necessidade da cultura ao longo do seu ciclo fenológico.

O manejo de fertirrigação preconiza que os fertilizantes devem ser aplicados em quantidades adequadas, conforme a necessidade da planta, de forma sustentável, isto é, de forma a não causar impacto negativo no solo (transformações físicas e químicas que causem desequilíbrios químicos, lixiviação de nutrientes e contaminação ambiental), que o deixem em pior situação que a anterior ao início das fertirrigações.

Apesar do manejo da cultura do cafeeiro estar bem consolidado, ainda há espaço para seu aprimoramento na aplicação de fertilizante via água de irrigação, principalmente no que se refere à adubação nitrogenada e/ou potássica, que apresenta carências de informações em alguns pontos importantes que precisam ser esclarecidos, que são: quantidade de nutrientes exigidos pelo cafeeiro irrigado, qual a melhor dose de nutrientes a ser aplicada nas plantas, especificar e comparar as principais consequências para o solo e para as plantas

de uma fertirrigação contínua (com doze aplicações ao ano), com uma fertirrigação apenas no período chuvoso (com quatro aplicações ao ano).

Entretanto, além dessas respostas, o outro fator que deve ser observado conjuntamente, é o estado hídrico no solo, para que o mesmo não venha se configurar como fator limitante para o desenvolvimento da cultura, causando diminuição na produtividade. Desta forma a reposição de água no solo deve ser feita de forma adequada. De acordo com Silva et al. (2008) parte do sucesso de uma agricultura irrigada está relacionada a um manejo adequado dos recursos naturais solo-água, que interagindo com a atmosfera e a planta, determinam as condições potenciais de máxima produtividade de uma cultura em plenas condições de sanidade e nutrição.

Logo, torna-se necessário o estudo de variáveis, como o coeficiente de cultura (K_c), que segundo Allen et al. (1994) expressa numericamente a relação entre a evapotranspiração potencial e de referência, tendo significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, da arquitetura (parte aérea e sistema radicular), da cobertura vegetal e da transpiração da planta. No entanto, Segundo Lima e Silva (2008), a determinação de lâmina de irrigação por meio de K_c , pode ser equivocada se as condições dos locais em que o K_c foi obtido e o local onde a cultura está implantada forem diferentes, podendo-se superestimar ou subestimar o consumo de água pela lavoura.

Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a evolução do índice de área foliar (IAF), o K_c único, e a produtividade média do cafeeiro. Além disto, monitorar os íons NO_3^- e K^+ no extrato saturado do solo, em função da adubação nitrogenada e potássica no cafeeiro arábica irrigado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cafeicultura: considerações gerais

Coffea arabica L. é originária dos vales das regiões montanhosas da Abissínia, caracterizada por densas florestas tropicais ao abrigo de altas temperaturas e precipitações bem distribuídas. É originalmente considerada uma espécie adaptada a sombra, entretanto, a maioria das lavouras no Brasil são conduzidas a pleno sol, com temperaturas acima de 30°C nos meses de janeiro a março, época de maior crescimento, ficando sujeitas a veranicos e altos níveis de radiação (ALVES; LIVRAMENTO, 2003; SILVA; SILVA, 2012).

O cafeeiro da espécie arábica tolera bem e pode ser beneficiado por deficiências hídricas de até 150 mm por ano, principalmente se estas coincidirem com o período de dormência da planta, não se estendendo até a fase de floração e início da frutificação (THOMAZIELLO et al., 2000).

Segundo Ricci, Fernandes e Castro (2002) essa rubiácea reage positivamente a um período de seca, que entretanto, não deve durar mais do que três meses. A quantidade de chuva ideal para o desenvolvimento da cultura fica na faixa de 1500 a 1900 mm anuais, se bem distribuída. Uma distribuição muito irregular de chuva causa floração desuniforme e maturação desigual dos frutos.

De acordo com Alves e Livramento (2003) o sucesso da expansão da cafeicultura no Brasil deve-se, em parte, às pesquisas no campo do manejo da irrigação, melhoramento genético, solos e nutrição mineral das plantas, maior conhecimento das doenças e fisiologia do vegetal. Como resultados dessas pesquisas, hoje se cultivam no Brasil um grande número de cultivares adaptadas as diferentes regiões.

2.2 Irrigação na cafeicultura

A irrigação do cafeeiro tem recebido grande destaque nos últimos anos, cujo interesse se deve a vários fatores, dentre os quais se destacam: expansão da cafeicultura para novas fronteiras; evolução da técnica da irrigação; diminuição dos custos dos sistemas de irrigação e mudança do pensamento do cafeicultor, priorizando a eficiência e a qualidade da produção (MANTOVANI; SOARES, 2003; SANTINATO; FERNANDES, 2002). Segundo Santinato e Fernandes (2012) no Brasil, cerca de 251 mil hectares de cafeeiros são irrigados, e o potencial produtivo médio é de 10 milhões de sacas beneficiadas por ano.

De acordo com Sant'Ana et al. (2013), a adoção dessa tecnologia pode trazer para a cafeicultura um considerável incremento na produtividade. Para tanto, a escolha do sistema de irrigação a ser adotado deve ser feita de forma bastante criteriosa.

Deve-se levar em conta que não há um sistema de irrigação ideal para qualquer situação. Para cada propriedade, dependendo do tamanho da área, da topografia da área, da quantidade e tipo de mão de obra disponível, das condições de clima e solo e da disponibilidade de água, sempre existem opções de sistemas de irrigação que permitem alcançar de forma sustentável e econômica, o desejado incremento de produtividade da lavoura cafeeira (SANT'ANA et al., 2013).

Assim, deve-se compreender corretamente as relações entre a água e o cafeeiro para a tomada de decisões mais fundamentadas sobre a escolha, implantação do sistema de irrigação e manejo das lavouras cafeeiras.

2.3 Irrigação por gotejamento na cafeicultura

A irrigação por gotejamento é um sistema fixo, cujo custo elevado limita seu uso a culturas nobres, com alta capacidade de retorno. Além disso, exige alto investimento em obras e aquisição de equipamentos para captação, condução, controle e distribuição da água, devendo ser considerados gastos com energia e mão de obra para operação e manejo do sistema, que representam importantes custos adicionais à produção (SILVA; FARIA; REIS, 2003).

Um dos sistemas de irrigação mais empregados na cafeicultura, o gotejamento, possibilita economia de água e fertilizantes, entretanto, limita a zona radicular ao bulbo úmido, que pode ser salinizado se manejado inadequadamente (FARIA et al., 2009).

No Brasil, 28,6% das lavouras irrigadas utilizam o sistema de gotejamento, o que corresponde a 71.700 hectares dos 251 mil hectares irrigados (SANTINATO; FERNANDES, 2012).

Fernandes et al. (2000), usando sistema de irrigação por gotejamento e irrigando o cafeeiro o ano todo, na região de Bonfinópolis, MG, em solo LVA (Latosolo Vermelho Amarelo), obtiveram produtividade na safra de 1998 igual a 45,7 sacas ha⁻¹.

Melo et al. (2005) irrigando plantas da cultivar Acaia Cerrado, com lâmina de 120% da evaporação do tanque classe A (ECA) por gotejamento, conseguiram rendimento de 437 L sc⁻¹ e produtividade média de 48,51 sc ha⁻¹, na região de Uberlândia, MG, para a safra de 2004.

Silva et al. (2005) avaliando os efeitos da irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro, na produção acumulada das seis primeiras colheitas em Lavras, Sul de Minas Gerais, cultivar Acaia Cerrado MG-1474, no espaçamento de 3,0 m x 0,6 m, concluíram que o uso dessa técnica aumentou a produtividade dos cafeeiros no município de Lavras, MG, sendo a reposição de água

equivalente a 100% da ECA na área efetivamente molhada, o melhor tratamento testado.

Rezende et al. (2006) avaliando lâminas de irrigação em lavoura cafeeira recepada na cidade de Lavras, MG, cultivar Topázio MG-1190 com 99 meses de idade, submetida a um processo de poda drástica (recepa sem pulmão), aos 65 meses de idade, concluíram que com a prática da irrigação, houve aumentos de produtividade do cafeeiro, além de ter contribuído para a melhora do rendimento da lavoura e retardo da maturação dos frutos.

Silva et al. (2008) usaram o sistema de irrigação por gotejamento, com gotejadores autocompensantes espaçados 0,3 m e vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, e obtiveram um aumento significativo sobre a produtividade do cafeeiro na região de Lavras, MG, correspondendo a mais de 150% de aumento, em relação ao cafeeiro não irrigado.

Segundo Paiva et al. (2011) em Varginha, também no sul de Minas Gerais, a irrigação adequada no período crítico para o cafeeiro propiciou ganhos de 27,5% na produtividade média de seis safras, quando comparado ao cafeeiro cultivado sob regime de sequeiro.

Nascimento, Spehar e Sandri (2014) avaliaram diferentes regimes hídricos sobre a produtividade do cafeeiro orgânico em plantio adensado ($7.142 \text{ plantas ha}^{-1}$), cv. IAPAR 59, recepado após 90 meses do plantio, no Latossolo Vermelho-amarelo (LVA), textura argilosa. Esses autores concluíram que a irrigação mantida até a colheita, associada a condução da poda de recepa, aumenta a produção e a produtividade bienal e acumulada.

2.4 Adubação no cafeeiro fertirrigado

Nos últimos anos, a forma tradicional de adubação em cultivos irrigados vem sendo substituída pela aplicação de fertilizantes via água de irrigação. Para

que a irrigação seja viável, torna-se necessário adotar práticas que contribuam para o aumento da produtividade e do lucro. Uma destas práticas é a fertirrigação, que tem como benefício, a facilidade do parcelamento da adubação em cobertura, fornecendo nutrientes de acordo com a absorção da planta (FERNANDES et al., 2013).

Na aplicação via água de irrigação, o tempo de chegada dos fertilizantes às raízes das plantas é significativamente reduzido, uma vez que o fertilizante é aplicado juntamente com água. Na adubação convencional, os nutrientes sólidos são depositados próximos da planta e na superfície do solo, ficando dependente da intensidade e frequência das chuvas (BORGES; COELHO, 2009).

Segundo Coelho e Silva (2005) a utilização da fertirrigação oferece diversas vantagens em comparação com o método convencional de aplicação de fertilizantes. Dentre elas, pode-se destacar a não compactação do solo e o fim de injúrias mecânicas nas plantas, causadas pela entrada de equipamentos pesados nas áreas de cultivo para promover a adubação pelos métodos tradicionais, a dosagem de nutrientes pode ser mais cuidadosamente regulada, monitorada, distribuída e parcelada no perfil do solo, conforme as necessidades da cultura ao longo de seu ciclo fenológico.

A fertirrigação pode permitir a aplicação precisa de nutrientes para satisfação das exigências da cultura nas diferentes fases fenológicas, com solubilização otimizada dos nutrientes, podendo atingir aproveitamento ou eficiência de aplicação da ordem de 80 a 90% para o N e o K (VILLAS BOAS; ZANINI; FEITOSA FILHO, 2002). O sucesso das aplicações de nutrientes via fertirrigação está intimamente ligado ao bom dimensionamento do sistema, à implantação adequada e, ainda, à manutenção deste, que determina o nível de uniformidade de aplicação de água e dos nutrientes (SOARES et al., 2000).

De acordo com Konrad (2002) a utilização indevida de fertilizantes gera perdas de nutrientes causadas pelo processo de lixiviação. Tal fato tem grande

importância para o produtor agrícola, por significar baixa eficiência de utilização de nutrientes pelas culturas e, por consequência, resultar em menores rendimentos.

Em experimento conduzido em Rio Preto, MG, Antunes et al. (2000), estudando o efeito da irrigação e da fertirrigação na produção do cafeeiro Catuaí Vermelho, com oito anos de idade, verificaram superioridade de 66% do tratamento irrigado em relação a testemunha não irrigada, e 123% de superioridade dos tratamentos fertirrigados.

Fagundes (2006) comparando a eficiência nutricional e a viabilidade econômica da adubação líquida, em relação a adubação convencional sólida, constatou que a adubação líquida proporcionou maior crescimento vegetativo e menor custo econômico que a adubação sólida.

Apesar das vantagens que a fertirrigação pode proporcionar com a maximização do aproveitamento dos nutrientes associada a melhor metodologia de aplicação gerando economia de insumos, as recomendações de adubação ainda são pouco específicas, sem informações fundamentadas por pesquisas, em relação ao parcelamento e doses em sistemas irrigados.

Rezende et al. (2010) avaliaram os efeitos de diferentes regimes hídricos (irrigado e não irrigado), e fertirrigação combinada com diferentes doses de adubo para N (15; 30; 45 e 60 g m⁻¹), P (3; 6; 9 e 12 g m⁻¹) e K (15; 30; 45 e 60 g m⁻¹), na fase de crescimento inicial de duas cultivares de cafeeiro, na região noroeste do Paraná. Observaram que houve interação entre regimes hídricos e fertirrigação *versus* doses de NPK para algumas variáveis de crescimento, porém, esses resultados não apresentaram tendência comum que permitisse constatar qual a dose mais indicada para cada regime hídrico na fase de crescimento inicial do cafeeiro.

Segundo Sobreira et al. (2011) a adubação de N e K para cafeeiro fertirrigado na formação (1º e 2º ano pós-plantio) deve ser 30% inferior a

recomendada por Guimarães et al. (1999) para o cultivo em sequeiro. Entretanto, Santinato e Fernandes (2002) recomendam um acréscimo de 30% no nível de adubação em cafeeiro irrigados em produção. Burt (1995) afirma que quando feita de forma criteriosa, o uso da fertirrigação pode promover redução na ordem de 25% no nível de fertilizante aplicada, sem nenhum dano as plantas.

Em relação ao numérico de aplicações, Coelho et al. (2004) avaliaram diferentes formas de parcelamento da adubação (quatro, doze, vinte e quatro e trinta e seis vezes) por fertirrigação, para o cafeeiro arábica, e observaram que os números de aplicações não diferiram entre si. Entretanto, Sobreira et al. (2011) comparando duas formas de parcelamento (doze e quatro aplicações ao ano), concluíram que no parcelamento de doze vezes, há um maior desenvolvimento das plantas, devido a um maior aproveitamento dos nutrientes pela cultura, pois, mantém o teor foliar de N mais adequado durante a sua fase de formação.

As fontes de pesquisas indicam que não há uma unanimidade quanto aos níveis de adubo que deve ser aplicados em cafeeiros fertirrigados.

2.5 Nitrogênio (N) e potássio(K) no solo cultivado com cafeeiro

O fornecimento de nutrientes minerais, em especial o N, para o cafeeiro, deve ser suficiente para suprir as demandas dos frutos, bem como dos órgãos vegetativos. Desta forma, o suprimento de nutrientes deve anteceder os picos de acúmulo de nutrientes pelos frutos (LAVIOLA et al., 2008). Durante seu desenvolvimento, distribuído em seis fases fenológicas, a capacidade de absorção e de assimilação do N pelo cafeeiro varia bastante. A demanda aumenta na fase de expansão, entretanto, a maior necessidade se dá no estágio de granação dos frutos (PEZZOPANE et al., 2003).

Como a maior absorção deste nutriente ocorre no período de granação e maturação dos frutos, é preciso que seja feita a reposição deste nutriente através

de adubações parceladas, nos períodos de maior necessidade para a vegetação e para a produção (FENILLI et al., 2007; FERNANDES et al., 2009).

O fornecimento de N à planta pode ser feito na forma nítrica (NO_3^-), amoniacal (NH_4^+) e amídica. Essas formas, ao serem aplicadas no solo, podem modificar suas propriedades químicas e alterar o seu pH. Como a movimentação do N está relacionada com a forma em que ele se encontra, as mudanças químicas provocadas pelo íon poderão ocorrer em diversas camadas do solo (COSTA, 2005).

O K para o cafeeiro é tão exigido quanto o N, portanto, um nutriente extremamente importante para cultura, sendo este, exigido em maior proporção durante o crescimento foliar (MANCUSO, 2012). Malavolta (1986) afirma que a faixa adequada de K disponível no solo para cafeeiro é de 117 a 156 mg dm^{-3} (3,0 a 4,0 mmolc dm^{-3}).

2.6 Graus-dia de desenvolvimento (GDD)

O método de graus-dia é bastante discutido na literatura, e consiste no uso de modelos matemáticos para estimar a soma das temperaturas diárias acima da temperatura base necessária para o desenvolvimento da planta. O conceito de graus-dia, também denominado unidades térmicas, assume a existência de uma temperatura-base, abaixo da qual o crescimento vegetal pode ser desconsiderado. Cada grau acima da temperatura base corresponde a um grau-dia (PEZZOPANE et al., 2008). Os principais modelos discutidos e utilizados estão apresentados em: Arnold (1959), Dufault (1997), Ometto (1981) e Snyder (1985).

Esses modelos necessitam das temperaturas diárias do local de plantio. Mas, por facilidade, utilizam basicamente as temperaturas máximas e mínimas registradas no dia, e as temperaturas base inferior e superior, que expressam a

faixa de temperatura na qual a planta consegue completar sua fase fenológica, ou mesmo seu ciclo total de desenvolvimento.

As faixas de temperaturas (temperaturas base) assim como a temperatura ótima, variam de espécie para espécie (WUTKE et al., 2000). Na região do sul de Minas Gerais (município de Lavras, MG), Lima e Silva (2008) determinaram as temperaturas base inferior e superior para o cafeeiro arábica do transplântio até a primeira florada, sendo os valores obtidos 12,9 e 32,4°C, respectivamente.

2.7 Coeficiente de cultura (Kc) do cafeeiro

Um simples valor de Kc não pode ser estabelecido para todas as situações climáticas, portanto, deve ser determinado um coeficiente de cultura para cada estágio de desenvolvimento da cultura em estudo (MARTINS et al., 2009).

De acordo com Medeiros, Arruda e Sakai (2004), preferencialmente, o Kc deve ser determinado para as condições locais nas quais será utilizado, todavia, sua determinação sob condições de campo exige um grande esforço de pessoal técnico, equipamentos e custos, em virtude da quantidade de informações, controles e monitoramentos necessários ao balanço hídrico em uma área irrigada.

A utilização do Kc, as metodologias e os procedimentos de cálculo, têm sido apresentados e recomendados pela Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; KASSAM, 1979; DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Numa tentativa de detalhar o consumo de água do cafeeiro, Gutiérrez e Meinzer (1994) obtiveram Kc de 0,58 para cafeeiros com aproximadamente um ano de plantio, e valores médios de 0,75 e 0,79 no período de dois a quatro anos de idade. Para cafezais com manejo adequado e altura de 2 a 3 m, em clima

subúmido, Allen et al. (1998) propõem K_c entre 0,90 e 0,95, na ausência de plantas daninhas, e de 1,05 a 1,10, na presença dessas, adotando a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pela equação de Penman-Monteith (FAO). Arruda et al. (2000) apresentaram valores entre 0,73 e 0,75 nos primeiros anos de plantio e de 0,87 a 0,93 aos 7 e 8 anos, respectivamente.

Oliveira, Silva e Castro Neto (2003) estimaram a evapotranspiração da cultura (ET_c) e o K_c , com base em um balanço hídrico para a região de Lavras-MG, e concluíram que o cafeeiro com dezesseis anos de cultivo apresentou uma ET_c no período analisado, variando de 2,52 a 3,50 mm d^{-1} , com média de 2,91 mm dia^{-1} e um K_c variando de 0,72 a 1,50, com média de 0,96. O cafeeiro após três anos de recepa, apresentou uma ET_c no período analisado, variando de 1,55 a 2,01 mm d^{-1} com média de 1,72 mm dia^{-1} e K_c variando de 0,44 a 0,87, com média de 0,57.

Também na região de Lavras-MG, Sato et al. (2007) ao determinar a ET_c e o K_c de um cafezal (*Coffea arabica* L.), após quatro anos da recepa, utilizando o método do balanço hídrico, obtiveram ET_c entre 1,23 e 4,39 mm d^{-1} e K_c variando de 0,59 a 1,16.

A determinação de lâmina de irrigação por meio de K_c pode ser equivocada, se as condições dos locais em que este foi obtido e onde a cultura está implantada forem diferentes, podendo-se superestimar ou subestimar o consumo de água pela lavoura. A utilização apropriada de variáveis meteorológicas que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas permite determinar com maior precisão, a duração das fases fenológicas das plantas cultivadas (LIMA; SILVA, 2008). Nesse contexto, o conhecimento do efeito das variáveis climáticas na produtividade e nas fases fenológicas da cultura tem grande aplicação (ORTOLANI, 2001).

Segundo Barros, Maestri e Rena (1995), é restrito o conhecimento da demanda hídrica pelo cafeeiro, a qual é influenciada por fatores como localidade, cultivar, espaçamento, sistema de poda e densidade de plantio. Para Carr (2001), sabe-se pouco sobre o consumo hídrico das culturas, e os métodos atuais de estudo desse parâmetro para fins de irrigação, os quais são imprecisos e sujeitos a erros.

2.8 Modelos matemáticos na descrição do crescimento vegetativo e produtividade do cafeeiro

A descrição matemática da dependência dos parâmetros de crescimento e/ou produtividade de uma lavoura cafeeira, em relação ao nível de adubação, é uma ferramenta básica para determinação de estratégias de adubação que resultem no máximo retorno econômico. Na literatura, são encontrados poucos trabalhos que utilizaram modelos não lineares no estudo de parâmetros vegetativos e/ou produtivos de lavouras cafeeiras.

Dentre estes, pode-se citar Silva e Volpe (2005), que estudaram o crescimento do fruto do cafeeiro em dois sistemas de plantio, utilizando o modelo logístico de três parâmetros.

Carvalho et al. (2006) utilizaram o modelo não linear logístico para descrever o crescimento em altura, e o modelo linear simples para descrever o número de ramos plagiotrópicos, ambos em função do tempo, de plantas do cafeeiro cultivadas nas densidades de plantio 2500 e 10000 plantas ha⁻¹, e sob o efeito dos regimes de irrigação testemunha (não irrigado), 20 kPa e 100 kPa.

Wyzykowski (2009) testou modelos não lineares como uma alternativa para avaliação do crescimento do diâmetro de copa do cafeeiro, sob diferentes manejos de irrigação.

Pereira et al. (2014) analisaram as variáveis altura de planta por meio dos modelos não lineares (Logístico e Gompertz) e o número de ramos plagiotrópicos utilizando modelo linear simples e quadrático, ambos em função das diferentes densidades de plantio, 3333 e 10000 plantas ha⁻¹, e regimes de irrigação(sem irrigação, 20 kPa e 60 kPa), ao longo do tempo.

Apesar dos vários modelos estatísticos existentes para descrever esta curva de resposta, há uma predominância do uso de polinômios do segundo grau neste tipo de estudo, em que a escolha do modelo raramente é explicada, indicando que a possível escolha seja em função da facilidade com que seus parâmetros podem ser ajustados, e sua disponibilidade em inúmeros pacotes de análise estatística.

Segundo Neeteson e Wadman (1987) os modelos quadráticos tendem a superestimar a resposta, se o ponto máximo na curva é tomado como a melhor taxa de fertilização.

Por isso, a importância de estudos que visam desenvolver as recomendações específicas de campo, com base na relação entre doses de N e K₂O ótimas para o solo, testando inicialmente, qual o modelo mais adequado para uma situação em particular.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no Setor de Cafeicultura do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, Minas Gerais. As coordenadas geográficas da referida área são 21° 14' S de latitude, 44° 58' W de longitude e altitude média de 910 m.

O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen (mesotérmico com verões brandos e suaves, e estiagem de inverno) (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférico de textura muito argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2006), e seus atributos físicos e químicos podem ser observados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 Atributos físicos do solo da área experimental em três camadas do solo e sua classificação textural, Lavras-MG. UFLA, 2015

Camadas do solo (m)	Análise Textural			Classe Textural
	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	
0-0,2	220	150	630	Muito Argilosa
0,2-0,4	210	110	680	Muito Argilosa
0,4-0,6	200	70	730	Muito Argilosa

Tabela 2 Atributos químicos do solo da área experimental referente a camada de 0-0,2 m, Lavras-MG. UFLA, 2015

Atributos	2007	2010	2011	2012
pH (H ₂ O)	6,7	5,2	4,8	4,9
Fósforo (P) – mg dm ⁻³	15,4	87,4	46,3	31,03
Potássio (K) - mg dm ⁻³	137	76	205,0	104
Cálcio (Ca ²⁺) – cmol _c dm ⁻³	4,4	2,0	1,8	1,3
Magnésio (Mg ²⁺) – cmol _c dm ⁻³	1,5	0,4	0,3	0,3
Alumínio (Al ³⁺) – cmol _c dm ⁻³	0,0	0,1	0,4	0,7
H+Al (Extrator SMP) – cmol _c dm ⁻³	2,1	4,8	6,3	6,4
Soma de bases trocáveis – cmol _c dm ⁻³	6,3	2,6	2,6	1,9
CTC (t) - cmol _c dm ⁻³	6,3	2,7	3,0	2,6
CTC a pH 7,0(T) - cmol _c dm ⁻³	8,4	7,5	8,9	8,3
Índice de saturação por bases (V) - %	75,0	35,1	29,2	22,5
Índice de saturação de alumínio (m) - %	0	3,7	13,0	27,0
Matéria orgânica (MO) - dag kg ⁻¹	4,3	-	2,9	3,8
Fósforo remanescente (P-rem) – mg L ⁻¹	7,7	-	13,8	15,7
Zinco (Zn) –mg dm ⁻³	5,1	-	8,5	4,6
Ferro (Fe) – mg dm ⁻³	76,7	-	36,3	30,3
Manganês (Mn) – mg dm ⁻³	22,5	-	15,1	20,3
Cobre (Cu) – mg dm ⁻³	3,7	-	4,6	4,3
Boro (B) – mg dm ⁻³	0,2	-	0,2	0,3
Enxofre (S) – mg dm ⁻³	38,2	-	-	-

3.2 Instalação e condução do experimento

O plantio do experimento foi realizado em 18 de maio de 2007, no espaçamento de 2,5 m entre linhas por 0,6 m entre plantas (6666 plantas ha⁻¹). A cultivar utilizada foi a ‘Catiguá MG-3’ (Catuaí Amarelo IAC 86 x Híbrido de Timor UFV 440- 10), cujas mudas foram fornecidas pela EPAMIG - Centro Tecnológico do Sul de Minas.

A calagem e as adubações de implantação e pós-plantio foram realizadas com base nas recomendações de Guimarães et al. (1999). As plantas foram conduzidas com apenas uma haste, sendo realizada a desbrota dos novos ramos ortotrópicos emitidos. O manejo de plantas daninhas na linha de plantio foi

realizado por meio de capina manual e, nas entrelinhas, fez-se aplicação do herbicida glyphosate (glicina substituída) ($2,3 \text{ L ha}^{-1}$) e uso de roçadora mecânica.

No manejo de doenças, utilizou-se para o controle da cercosporiose, fungicida com epoxiconazol (triazol) + piraclostrobina (estrobilurina) na dose de $1,5 \text{ L ha}^{-1}$. Pelo fato da cultivar utilizada no experimento apresentar resistência a ferrugem, não houve necessidade de controle químico específico para esta doença. Em relação às pragas, o controle de formigas foi realizado sempre que necessário, com fipronil a 0,01% ($10,0 \text{ g m}^{-2}$).

A aplicação dos micronutrientes foi realizada sempre que necessário, por meio de pulverizações foliares, utilizando sulfato de zinco, cloreto de potássio, oxiclreto de cobre e ácido bórico, de acordo com a recomendação de Guimarães et al. (1999). Em relação aos macronutrientes, o Ca^{2+} e o Mg^{2+} foram fornecidos via calcário. O P, na forma de superfosfato simples, foi aplicado em dose única (65 g por planta) no plantio da cultura (maio/2007).

As adubações com N e K foram feitas via fertirrigação, utilizando-se cinco níveis de adubação em duas formas de parcelamento: quatro vezes ao ano no período das chuvas (Nov., Dez., Jan., Fev.) e doze vezes ao ano, sendo uma aplicação a cada mês, em quantidades iguais. Foram utilizadas como fontes de nutrientes a uréia pecuária, que forneceu parte o N (45% de N) e o nitrato de potássio que forneceu N e K (13% de N e 44% de K_2O).

Na fase de crescimento do cafeeiro os cinco níveis de adubação de N e K_2O utilizados foram 70%, 100%, 130%, 160% e 190% da recomendação para sequeiro, de acordo com a recomendação de Guimarães et al. (1999) e na fase de produção esses níveis de adubação estudados foram alterados para 30%, 80%, 130%, 180% e 230% da recomendação de sequeiro. Esta mudança foi feita em novembro de 2009, em função da ausência de resposta dos níveis de adubação inicialmente propostos (70%, 100%, 130%, 160% e 190% da recomendação

para sequeiro), conforme pode ser constatado em Sobreira et al. (2011), os quais observaram que em ambos os parcelamentos (quatro e doze adubações no ano) o aumento de 90% ou a redução de 30% da dose recomendada de N e K₂O, não alterou o crescimento vegetativo do cafeeiro no primeiro e segundo ano de formação.

O cálculo da adubação foi feito com base na análise foliar do teor de nitrogênio e na análise de solo de cada ano (Tabela 3), e na produtividade média esperada, segundo a recomendação de sequeiro. Na Tabela 3, encontram-se as quantidades de fertilizantes recomendadas para o cafeeiro na fase de produção (2010, 2011, 2012 e 2013). As quantidades recomendadas para 100% (padrão) foram: 190 kg de K₂O ha⁻¹ ano⁻¹ e 250 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹ para 2010, 75 kg de K₂O ha⁻¹ ano⁻¹ e 400 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹ para 2011, 340 kg de K₂O ha⁻¹ ano⁻¹ e 450 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹ para 2012 e 100 kg de K₂O ha⁻¹ ano⁻¹ e 450 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹ para 2013.

Tabela 3 Teores médios de K e P encontrados no solo (camada de 0 - 0,2 m), teor foliar e quantidades totais das duas fontes de fertilizantes para 100% da dose recomendada para o cafeeiro em sequeiro na fase de produção no ano de 2010, 2011, 2012 e 2013, Lavras-MG. UFLA, 2015

Ano	Análise do solo		Teor foliar	Fertilizantes totais das duas fontes	
	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	N dag kg ⁻¹	Ureia kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	KNO ₃ kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
2010	87,42	76	2,8	431	431
2011	46,3	205	2,5	839	171
2012	31,03	104	2,6	778	772
2013	31,36	204	2,8	934	227

3.3 Delineamento experimental

O delineamento utilizado no experimento foi o de blocos casualizados, com três repetições. O experimento foi conduzido em duas áreas adjacentes, uma ao lado da outra, as quais foram diferenciadas pelas duas formas de parcelamento de adubação. Em uma área foi utilizada quatro aplicações ao ano (P4) e na outra, doze aplicações (P12) ao ano. Cada uma dessas áreas ocupou 675 m² com 450 plantas, e foram repartidas em três blocos (150 plantas por bloco). Dentro de cada bloco foram sorteados os níveis de adubação, 30%, 80%, 130%, 180% e 230% da recomendação de N e K₂O, para cafeeiros cultivados em sequeiro segundo Guimarães et al. (1999).

Cada parcela foi composta por dez plantas, sendo as oito centrais consideradas úteis. Para cada linha de tratamento foram deixadas bordaduras duplas, de forma a não haver interferência entre tratamentos.

3.4 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação implantado na área experimental foi projetado para irrigar, individualmente, qualquer uma das parcelas do experimento. O sistema de irrigação constou de uma unidade central de controle (sistema de bombeamento, filtros de areia e de tela, injetor de fertilizantes, manômetros e conexões), linha principal de tubos de PVC azul, DN 50 e PN 40, linhas de derivação de PVC marrom, DN 20 e PN 40, linhas laterais com tubo flexível de polietileno de 16 mm, PN 40, gotejadores Katiff autocompensantes (vazão de 3,75 L h⁻¹) e registros. O espaçamento entre linhas laterais foi de 2,5 m com gotejadores espaçados a cada 0,3 m. Em cada linha de plantio foi instalada uma linha lateral, assegurando a formação de uma faixa molhada contínua ao longo das linhas de plantas com 0,6 m de largura (Figura 1).

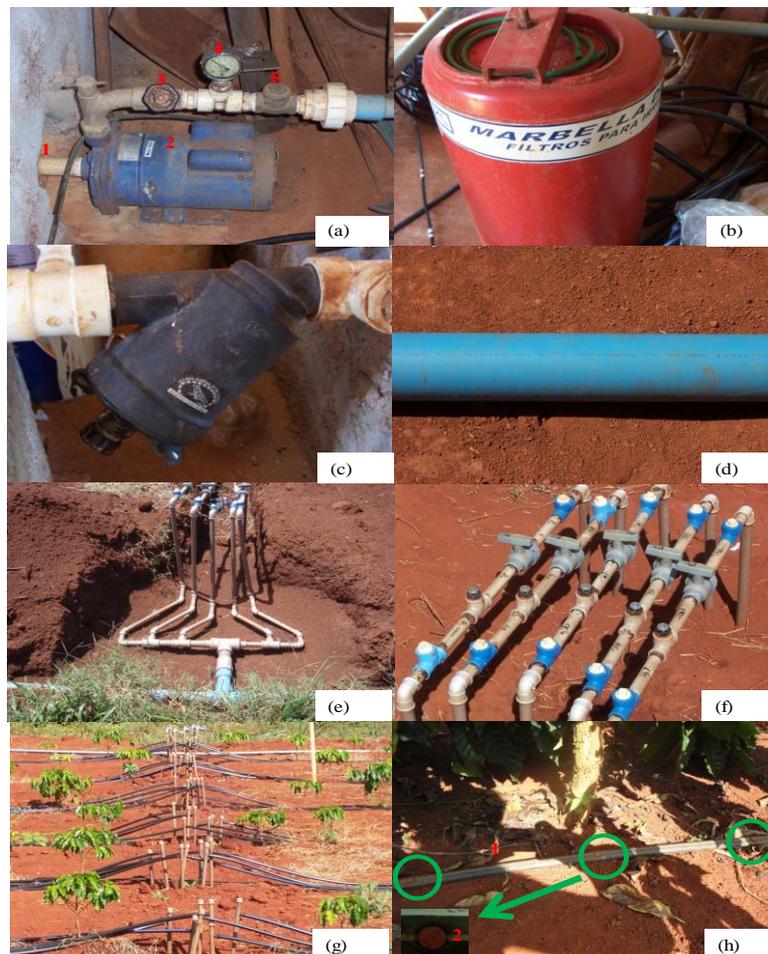


Figura 1 Sequência de ilustrações apresentando detalhes do sistema de irrigação utilizado no experimento: (a₁) sucção afogada de 1 ¼"; (a₂) moto-bomba centrífuga de 3 cv; (a₃) registro de gaveta de 1"; (a₄) manômetro; (a₅) válvula de retenção 1"; (b) filtro de Areia de 16"; (c) filtro de disco 1 ½"; (d) tubos de PVC azul DN 50 e PN 40 (linha principal); (e) tubos e registros nas linhas de derivação que conduzia a água até as linhas laterais das três repetições de cada nível de adubação; (f) individualização dos cinco níveis de adubação por meio de registros nas linhas de derivação de umas das áreas do experimento; (g) distribuição das linhas laterais; (h₁) linhas laterais com tubo flexível de polietileno de 16 mm, PN 40 e (h₂) gotejadores Katiff autocompensantes, vazão de 3,75 L h⁻¹

Foto: Alberto Colombo. Lavras-MG. UFLA, 2015.

3.5 Manejo de irrigação

O controle da irrigação foi realizado com base na tensão de água no solo, obtida diretamente por meio de tensiômetros (Figura 2) e a umidade para o cálculo da lâmina de irrigação por meio do modelo proposto por Genuchten (1980).

Os tensiômetros foram instalados nas profundidades de 0,10; 0,25; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00 m, em ambas as formas de parcelamento, e nas parcelas que receberem os níveis de 30%, 130% e 230% da recomendação de N e K_2O , totalizando seis baterias de tensiômetros. As leituras da tensão da água no solo foram feitas por meio de um tensímetro com escala de leitura em bar (Figura 2).



Figura 2 Sequência de ilustrações apresentando detalhes dos tensiômetro (a₁) com vacuômetro digital ou tensímetro de punção digital (a₂) utilizado no experimento; (b) verificação do nível da coluna de água dentro dos tensiômetros; (c) ajuste na leitura do tensímetro para obtenção do valor zero quanto o aparelho não estiver sob tensão de água no solo e (d) leitura da tensão de água no solo (bar), Lavras-MG. UFLA, 2015

As manutenções dos tensiômetros foram feitas periodicamente durante as operações, quando se verificava abaixamento da coluna de água dentro dos tensiômetros, completando com água, até observar a retirada do ar. A descrição e os princípios de funcionamento dos tensiômetros são relatados por Coelho e Teixeira (2004).

A correspondência entre tensão de água no solo e umidade foi obtida pela curva característica de umidade do solo. Para determinação dos parâmetros das curvas características de retenção de água, no solo da área experimental, foram coletadas amostras indeformadas nas camadas do solo de 0 - 0,2 m; 0,2 - 0,4 m e 0,4 - 0,6m. Posteriormente, as amostras foram conduzidas ao Laboratório de Hidráulica para obtenção dos pontos da curva de retenção. Com os valores das umidades e suas respectivas tensões obtidas, procedeu-se aos devidos ajustes, conforme equação 1 proposta por Genuchten (1980), utilizando a ferramenta solver em uma planilha do Excel de acordo com a metodologia desenvolvida por Wraith e Or (1998).

$$\theta(h) = \theta_R + (\theta_S - \theta_R) \left[1 + (\alpha |h|)^n \right]^{-m} \quad (1)$$

em que,

θ = umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

θ_R = umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

θ_S = umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$),

h = potencial matricial (cm.c.a),

α = parâmetro de ajuste (cm.c.a^{-1} , representa o inverso da sucção mínima necessária para o início da remoção de água dos macroporos).

m e n = parâmetros de ajuste da equação, adimensionais.

Na Tabela 4, são apresentadas as curvas de retenção obtida no local do estudo para diferentes camadas do solo conforme o modelo de Genuchten (1980).

Tabela 4 Curvas de retenção para diferentes camadas do solo do local de estudo segundo o modelo de Genuchten (1980), Lavras-MG. UFLA, 2015

Camada do solo (cm)	Curva ajustada
0-20	$\theta(h) = 0,223 + 0,449 \left[1 + (0,045 h)^{1,583} \right]^{-0,368}$
20-40	$\theta(h) = 0,239 + 0,491 \left[1 + (0,065 h)^{1,562} \right]^{-0,360}$
40-60	$\theta(h) = 0,206 + 0,446 \left[1 + (0,132 h)^{1,507} \right]^{-0,336}$

As irrigações foram efetuadas utilizando turnos de rega fixos de duas vezes por semana (terças e sextas-feiras), quando a tensão da água no solo na profundidade de 0,25 m indicava valores de tensão entre 203,94 e 611,83 cm.c.a (20 e 60 kPa, respectivamente). Esta faixa de tensão foi adotada para o manejo de irrigação do experimento por manter o solo com umidade suficiente para o desenvolvimento adequado das plantas, conforme os resultados obtidos por Assis et al. (2014) e Carvalho et al. (2006).

Para cálculo da lâmina aplicada, foi considerada no início, após o plantio das mudas, a média das leituras dos tensiômetros de 0,10 e 0,25 m, sendo esse valor alterado devido ao desenvolvimento da planta (2007 e 2008) até atingir 0,60 m de profundidade, valor esse adotado a partir de junho de 2008 até o fim do experimento (2013).

3.6 Graus-dia de desenvolvimento (GDD)

Para determinação de graus-dia foram testados os métodos de Arnold (1959), Dufault (1997), Ometto (1981) e Snyder (1985), segundo a metodologia apresentada em Lima e Silva (2008).

Utilizou nesse estudo, a temperatura basal inferior da planta (T_b) igual a 12,9°C, e a temperatura basal superior igual a 32,4°C, conforme os resultados encontrados por Lima e Silva (2008). Os valores diários de temperatura foram obtidos na estação meteorológica automática μ Metos® situada no local da área experimental. Os graus-dia foram computados a partir do plantio das mudas em 18 de maio de 2007.

3.7 Avaliações

A seguir serão apresentados como foram feitas as avaliações dos teores de NO_3^- e K^+ no extrato saturado do solo, do índice de área foliar (IAF), do Kc simples, e da produtividade média do cafeeiro em função da adubação nitrogenada e potássica no cafeeiro arábica irrigado.

3.7.1 Monitoramento de nutrientes no extrato saturado do solo (NO_3^- e K^+)

Foram instalados extratores de solução do solo com cápsula porosa (Figura 3), abaixo do terço inferior das plantas, a 0,5 e 0,9 m de profundidade.

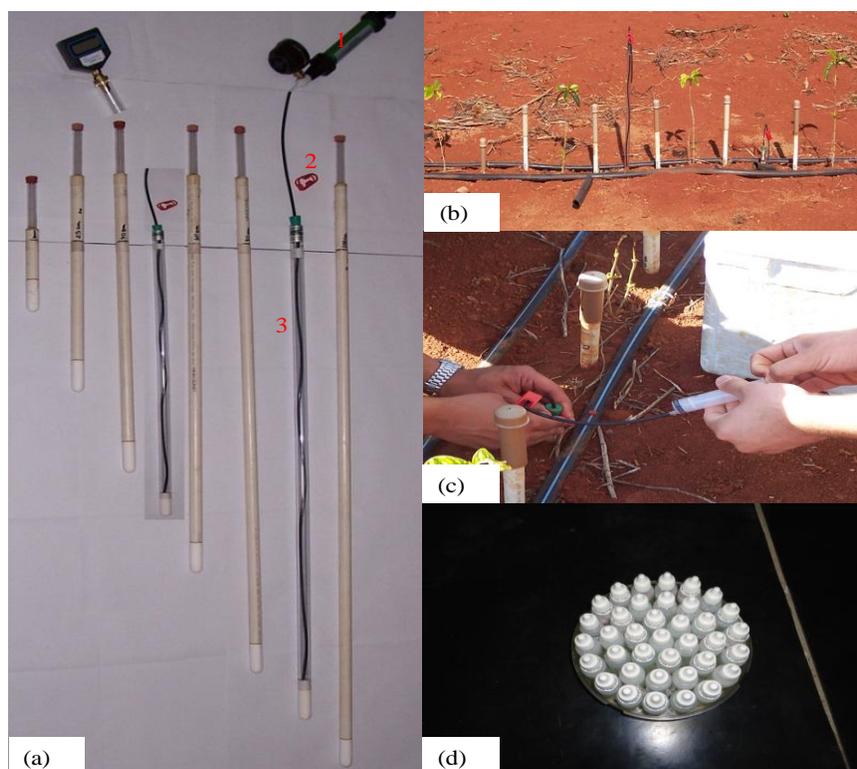


Figura 3 Sequência de ilustrações apresentando detalhes da coleta de solução: (a₁) bomba de vácuo manual; (a₂) presilha que era fixada na magueira flexível do extrator, impedindo a perda da sucção pela parte superior do extrator; (a₃) extrator de solução entre dois tensiômetros; (b) detalhes da distribuição dos extratores de solução no campo; (c) retirada da solução do solo com auxílio de uma seringa e (d) recipientes em que foram colocadas as soluções após a coleta de solução no campo

Foto: Alberto Colombo. Lavras-MG. UFLA, 2015.

Os teores de NO_3^- e K^+ foram monitorados quinzenalmente, durante o ano hidrológico 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, considerando o início do ano hidrológico em setembro de um ano, e o término em agosto do ano seguinte. Para a extração da solução do solo foram necessárias sucções de -70 kPa, por meio de uma bomba de vácuo manual, e após 2 horas, a solução do solo era

extraída com auxílio de uma seringa e colocada em recipientes que eram previamente higienizados. Em seguida, as soluções foram conduzidas ao Laboratório de Relação Água-Solo-Planta da UFLA para determinação dos teores de NO_3^- e K^+ na solução do solo.

As leituras de NO_3^- foram efetuadas por meio de equipamento de avaliação rápida de nitrato (Card Horiba), por meio de eletrodo específico para a leitura, que foram previamente calibrados com solução padrão. As determinações dos níveis de K^+ na solução do solo foram efetuadas por fotometria de chama, que foram previamente aferidos por meio da obtenção da curva de calibração com diferentes soluções conhecidas (10, 25, 50, 100, 250, 500 e 1000 ppm) de nitrato de potássio (KNO_3).

Os valores de concentração de NO_3^- e K^+ da solução do solo foram corrigidos para o seu equivalente no extrato saturado, de acordo com a relação entre a umidade do solo no momento da amostragem e a umidade do extrato saturado do solo (SILVA et al., 2003).

$$PPM_{sat} = PPM_{coletada} \frac{\theta_A}{\theta_S} \quad (2)$$

Onde,

PPM_{sat} = Concentração do extrato saturado (ppm);

$PPM_{coletada}$ = concentração lida na solução extraída da cápsula porosa (ppm);

θ_A = umidade no solo no momento da extração da amostra ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

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

Para melhor interpretação e devido ao grande número de observações, foram obtidas médias bimestrais da concentração de NO_3^- e K^+ (set-out, nov-dez,

jan-fev, mar-abr, mai-jun e jul-ago), totalizadas seis observações para cada ano hidrológico. Ressaltando que o último ano (2012/2013), teve apenas quatro observações (set-out, nov-dez, jan-fev e mar-abr).

3.7.2 Índice de área foliar (IAF)

A partir das medidas de crescimento em altura e diâmetro de copa dos cafeeiros foi avaliado o IAF nos anos de 2010, 2011, 2012 e 2013, para os diferentes níveis e formas de parcelamento utilizadas neste estudo.

As medidas de crescimento em altura e diâmetro de copa foram realizadas bimestralmente, totalizando seis épocas de avaliação, nos três primeiros anos (Jan, Mar, Mai, Jul, Set e Nov), e três épocas de avaliação no ano de 2013 (Jan, Abr e Jun). As medidas de altura de planta foram realizadas do colo das plantas até a gema apical dos caules, com auxílio de uma régua graduada, e as medidas do diâmetro de copa foram feitas também com auxílio de uma trena, no sentido transversal a linha de plantio.

Com base nos valores de altura média das plantas (H), diâmetro de copa (Dc) e distâncias entre plantas nas linhas de plantio (DP), estimou-se a evolução dos valores de área foliar do dossel (AF em m² por planta) por meio da Equação 3, que representa a metade da área superficial de um elipsoide:

$$AF = 2\pi \left(\frac{DP^P DC^P + DP^P H^P + DC^P H^P}{3} \right)^{\frac{1}{P}} \quad (3)$$

Em que,

DP = distância entre planta na linha de plantio (m),

DC = diâmetro de copa (m),

H = Altura de planta (m),

$$P = 1,6075.$$

O IAF foi calculado por meio da relação funcional entre a AF e área disponível às plantas, dada pelo espaçamento (2,5 x 0,6 m).

$$IAF = AF \frac{Np}{10000} \quad (4)$$

Onde,

AF = área foliar do dossel (AF em m² por planta),

Np = número de plantas por hectare.

3.7.3 Coeficiente de cultura simples (Kc) para cafeeiro arábica

Os valores de Kc foram determinados a partir das informações da ETc e da ET₀.

$$Kc = \frac{\frac{ETc}{\Delta t}}{\frac{ET_0}{\Delta t}} \quad (5)$$

Em que,

Kc: coeficiente de cultura,

ETc: evapotranspiração da cultura (mm),

ET₀: evapotranspiração referência (mm),

Δt = Intervalo entre irrigações sucessivas em que não houve precipitação, em dias (d).

Neste experimento, por se tratar de um ensaio em campo, optou-se por realizar o balanço hídrico entre os períodos de irrigações sucessivas, em que não houve precipitação.

Assim, a ETc foi determinada de forma simplificada (equação 6), sendo que a drenagem interna foi desconsiderada por se tratar de períodos sem chuvas, a ascensão capilar foi considerada igual a zero por se tratar de uma área com o lençol freático muito profundo, e assumiu-se também que o deflúvio superficial é igual a zero, pois a área onde o cafezal foi instalado é praticamente plana. Além disso, as irrigações foram realizadas com o sistema de irrigação por gotejamento, que tem como característica principal, a aplicação de água em intervalos menores (reduzido turno de rega) e a taxas (vazões) reduzidas.

$$ETc = I - \Delta A \quad (6)$$

Em que,

ETc = evapotranspiração da cultura (mm);

I = irrigação (mm);

ΔA : variação de armazenamento (mm).

Para determinação da evapotranspiração de referência (ETo) utilizou-se a equação Penman-Monteith (equação 7) parametrizada pela FAO (ALLEN et al., 1998).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \frac{(es - ea)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (7)$$

Em que,

λET = fluxo de calor latente (evapotranspiração) (MJ m⁻² d⁻¹);

Δ = declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹);

R_n = saldo de radiação (MJm⁻² d⁻¹);

G = fluxo de calor sensível no solo (MJ m⁻² d⁻¹);

γ = coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹);

ρ_a = densidade do ar (kg m⁻³);

c_p = calor específico do ar a pressão atmosférica constante (MJ kg⁻¹ °C⁻¹);

e_s : pressão de saturação do vapor d'água (kPa);

e_a : pressão parcial do vapor (kPa);

r_s = resistência de superfície (s m⁻¹);

r_a = resistência aerodinâmicas da cultura (s m⁻¹).

O método de Penman-Monteith, como formulado acima, inclui todos os parâmetros que governam a troca de energia e o correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração) para uma vegetação uniforme e extensa. A maioria dos parâmetros é medida, ou pode ser calculada por meio dos dados meteorológicos. A equação pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração de qualquer cultura, conforme a resistência de superfície (equação 8) e aerodinâmicas da cultura específica (equação 9).

$$r_s = \frac{r_l}{IAF_{ativo}} \quad (8)$$

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (9)$$

Em que,

r_s = resistência da superfície ($s\ m^{-1}$);

IAF = índice de área foliar ativo, iluminado pelo sol ($m^2\ m^{-2}$);

r_l = resistência dos estômatos da folha bem iluminada ($s\ m^{-1}$);

r_a = resistência aerodinâmicas da cultura ($s\ m^{-1}$).

z_m = altura de medida do vento (m);

Z_h = altura de medida de umidade (m);

z_{om} = comprimento da rugosidade transferência de domínio do momentum (m);

z_{oh} = comprimento da rugosidade transferência de domínio de calor e vapor (m);

d = plano zero, altura de deslocamento (m);

K = constante de von Kármán ($k = 0,41$);

U_z = velocidade do vento a altura z ($m\ s^{-1}$).

Da equação de Penman-Monteith original (equação 7) e as equações de resistência de superfície (equação 8) e aerodinâmicas da cultura específica (equação 9), o método FAO padronizou a obtenção da evapotranspiração de referência (ET₀), conforme a equação 10. Para evitar problemas de calibração local, que requeria tempo e estudos caros, admitiu-se como referência uma cultura hipotética com altura de 0,12 m que tem resistência de superfície (r_s) de $70\ s\ m^{-1}$ e um albedo de 0,23, assemelhando-se a evaporação de uma superfície extensa de grama verde, de altura uniforme, em crescimento ativo e com umidade do solo adequada (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{(T + 273)} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (10)$$

Sendo,

C_n e C_d = constantes que dependem da cultura de referência e do período de tempo do cálculo da evapotranspiração de referência padrão FAO (ET_0);

0,408 = coeficiente de redução de unidades ($m^2 \text{ mm MJ}^{-1}$);

273 = coeficiente para conversão de unidades (a temperatura requerida em Kelvin (K), como $1 \text{ K} = (^\circ\text{C}) + 273$);

T = temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$);

U_2 : velocidade do vento a 2 m ($m \text{ s}^{-1}$);

As demais variáveis já foram definidas anteriormente (equação 7);

Assim, para a cultura de referência grama e período diário, $C_d = 0,34 \text{ mm s}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ d}^{-1}$, $C_n = 900 \text{ s m}^{-1}$ e $G = 0$, a ET_0 foi obtida em mm d^{-1} .

Os dados diários de variáveis meteorológicas indispensáveis para estimativa da ET_0 , como temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade do vento, precipitação e radiação solar, foram monitorados pela estação meteorológica instalada na área.

Foram estimados os valores da radiação solar sem nuvens (R_{SO}) em Lavras-MG, entre maio de 2007 e agosto de 2013, pela equação 11 (ALLEN et al., 1998). Esse procedimento foi feito para verificar e validar os dados de radiação solar (R_s) medidos na estação meteorológica.

$$R_{SO} = (0,75 + 0,00002Z)R_a \quad (11)$$

Em que,

R_{SO} = radiação solar de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

R_a = radiação solar recebida ao topo da atmosfera da terra (radiação extraterrestre), em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$;

z = altitude, em m.

Os dados que deram subsídios ao cálculo da Kc foram obtidos periodicamente entre maio de 2007 e agosto de 2013, disponibilizando assim, 23 pontos de dados, ou seja, dados de 23 intervalos entre irrigações sucessivas em que não houve precipitação (Tabela 5).

Tabela 5 Valores observados de Kc para cafeeiro arábica sob irrigação por gotejamento na região Sul de Minas Gerais obtidos entre os meses de agosto de 2007 e agosto de 2013, Lavras-MG. UFLA, 2015

Período	ET ₀ /Δt (mm d ⁻¹)	ET _c /Δt (mm d ⁻¹)	KC
13/08 à 29/08/2007	2,8998	0,6323	0,2180
04/09 à 17/10/2007	3,5072	0,7382	0,2105
28/04 à 28/05/2008	2,0113	0,7728	0,3842
19/08 à 26/08/2008	2,8449	0,8100	0,2847
02/09 à 05/09/2008	3,1913	0,7620	0,2388
18/05 à 01/06/2009	1,8099	0,4701	0,2597
14/07 à 17/08/2009	3,1495	1,1115	0,3529
28/08 à 03/09/2009	4,2586	1,4145	0,3321
31/08 à 06/09/2010	3,4162	1,7902	0,5240
10/09 à 14/09/2010	3,4226	1,6380	0,4786
04/02 à 09/02/2011	4,2286	2,5927	0,6131
28/06 à 08/07/2011	1,4547	1,1422	0,7851
12/07 à 19/07/2011	1,5978	1,2973	0,8119
28/07 à 02/08/2011	3,1954	2,1580	0,6754
09/08 à 16/08/2011	2,6428	1,7119	0,6478
06/09 à 20/09/2011	3,2211	2,1796	0,6767
28/02 à 02/03/2012	4,1034	2,2053	0,5374
27/07 à 31/07/2012	2,0873	1,5007	0,7190
06/10 à 09/10/2012	3,6339	1,9865	0,5467
18/04 à 25/04/2013	2,3626	1,9378	0,8202
10/05 à 20/05/2013	2,1570	1,8088	0,8386
20/06 à 27/06/2013	1,8524	1,1357	0,6131
01/08 à 09/08/2013	3,3667	2,4104	0,7160

Os valores obtidos de Kc foram relacionados com o IAF do cafeeiro. Os IAF foram obtidos dos dados médios dos valores de alturas de plantas (H) e diâmetro de copa (Dc), medidas bimestralmente, entre o período de 2007 e 2013. A evolução temporal dos valores médios de H e Dc foi ajustada ao modelo logístico, equação 12 e 13, respectivamente (PEREIRA et al., 2014).

$$Y_{L_h} = a_{L_h} \left[1 + b_{L_h} e^{(-c_{L_h} t)} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$Y_{L_D} = a_{L_D} \left[1 + b_{L_D} e^{(-c_{L_D} t)} \right]^{-1} \quad (13)$$

Sendo que,

Y_{L_h} = Valores médios de altura de plantas (m) estimados pelo modelo logístico;

Y_{L_D} = Valores médios de diâmetro de copa (m) estimados pelo modelo logístico;

a_{L_h} , b_{L_h} e c_{L_h} = parâmetros de ajuste do modelo logístico para altura de plantas.

a_{L_D} , b_{L_D} e c_{L_D} = parâmetros de ajuste do modelo logístico para diâmetro de copa.

t = tempo, em dias, transcorrido desde o plantio das mudas no campo (DAP).

Utilizaram-se os valores médios de H e Dc, pois a lâmina de água aplicada nas irrigações era obtida das medidas das seis baterias de tensiômetros instalada no experimento, conforme descrito no item 3.5. Em seguida estimou-se os valores de IAF por meio das equações 3 e 4.

3.7.4 Produtividade de café beneficiado (sc ha⁻¹)

Em cada uma das quatro safras (2010, 2011, 2012 e 2013), a colheita foi efetuada manualmente, por meio de derrça manual no pano, iniciada quando o percentual de frutos verdes era de aproximadamente 20%. Do volume total medido (L) de frutos derrçados no pano, na área útil de cada parcela, que abrangia as oito plantas centrais da linha central de cada parcela, foi retirada uma amostra de 10 L. As amostras foram pesadas e conduzidas ao terreiro do Núcleo de Estudos em Cafeicultura (NECAF), para secarem ao sol, em peneiras de 1 x 1 m, até atingirem um teor de umidade próximo de 11%.

No caso do café de chão (varrição), os grãos sob a saia das dez plantas da linha central de cada parcela foram varridos, colocados em sacos de tela e postos para secar ao sol. Após a secagem, esses grãos foram lavados em um recipiente que permitiu a separação dos grãos de café dos resíduos de terra. Os grãos limpos de cada parcela foram novamente colocados para secar ao sol, em peneiras de 1 x 1 m, até um teor de umidade próximo de 11%.

Após a secagem ao sol, as amostras de café de pano e o café de chão de cada parcela foram beneficiados. Após o beneficiamento, foram determinados o volume, a massa e também a umidade das amostras de café de pano e do café de chão de cada parcela. Os valores de massa determinados foram padronizados para o seu equivalente com 11% de umidade, conforme indicado na equação 14:

$$M_{11\%} = \frac{M_{UB}(100 - UB)}{100 - 11} \quad (14)$$

Sendo,

$M_{11\%}$ = massa de café beneficiado padronizada para a umidade de 11% (kg);

M_{UB} = massa do café beneficiado com umidade UB (kg);

UB = teor de umidade do café beneficiado (%).

A produtividade final de café em cada tratamento, expressa em sacas de 60 kg de café beneficiado por hectare ($sc\ ha^{-1}$), foi calculada com base na expressão a seguir:

$$Y = \left[\left(\frac{VP}{8\text{ plantas}} \frac{M_P}{10L} \right) + \frac{MV}{10\text{ plantas}} \right] \frac{6666\text{ plantas ha}^{-1}}{60\text{ kg sc}^{-1}} \quad (15)$$

Onde:

Y= produtividade em cada tratamento ($sc\ ha^{-1}$);

VP= volume de café do pano colhido em 8 plantas (L);

M_P = Massa de café beneficiado da amostra de 10L de café de pano (kg);

MV= Massa de café de chão (Varrição) beneficiada sob a saia de 10 plantas (kg).

3.8 Análises

Para melhor entendimento, a seguir será demonstrado de forma separada e detalhada as análises feitas para cada item avaliado.

3.8.1 Monitoramento de nutrientes no extrato saturado do solo (NO_3^- e K^+)

Foi realizada análise da variação temporal da concentração média de NO_3^- e K^+ no extrato saturado do solo, e utilizada a estatística descritiva clássica, quantificando as variações nos níveis de NO_3^- e K^+ , para as profundidades de 0,5 e 0,9 m, durante todo o período em estudo. A análise dos dados foi realizada

com base na interpretação dos valores mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação.

Os valores médios das concentrações de NO_3^- e K^+ do extrato saturado do início e final, do período das chuvas, set-out e mar-abr, respectivamente, do ano hidrológico de 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, foram relacionados com os níveis de adubação (30, 80, 130 e 230%), por meio de regressão linear.

3.8.2 Índice de área foliar (IAF)

Devido a importância da comparação entre as duas formas de parcelamento (P4 e P12), os dados de IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) de cada época, ao longo dos quatro anos (2010, 2011, 2012 e 2013) de avaliações foram submetidos à análise de variância, utilizando-se uma adaptação da análise conjunta, conforme Pereira et al. (2014), tomando-se as duas formas de parcelamentos como dois locais, e realizando, primeiramente, uma análise em cada um deles para verificar a homogeneidade dos erros. Posteriormente, procedeu-se a análise conjunta das duas formas de parcelamentos, segundo esquema apresentado na Tabela 8 (item 4.3).

Em seguida, para análise de regressão foram selecionados dois modelos, Logístico (equação 16) e Gompertz (equação 17).

$$Y_L = a_L \left[1 + b_L e^{(-c_L t)} \right]^{-1} \quad (16)$$

$$Y_G = a_G e \left[-b_G e^{(-c_G t)} \right] \quad (17)$$

Sendo que,

Y_G = valores médios de IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) estimados pelo modelo Gompertz;

Y_L = valores médios de IAF ($m^2 m^{-2}$) estimados pelo modelo Logístico;
 a_L, b_L e c_L = parâmetros de ajuste do modelo Logístico;
 a_G, b_G e c_G = parâmetros de ajuste do modelo de Gompertz;
 t = tempo, em dias, transcorrido desde o plantio das mudas no campo
 (DAP).

Os parâmetros dos modelos foram ajustados aos valores observados por meio da ferramenta Solver do aplicativo Microsoft Excel.

Além do coeficiente de determinação (R^2), os indicativos estatísticos raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) e a eficiência do modelo (E_f) foram também utilizados para a avaliação do desempenho dos modelos conforme as equações a seguir:

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQ_{tot}} \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (19)$$

$$E_f = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 \right]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (20)$$

Em que,

E_f = eficiência do modelo;

n = número de dados;

O_i = valor observado;

\bar{O} = média do valor estimado; e

E_i = valor estimado.

Também foi feita a descrição do índice de área foliar (IAF) em função das doses de adubação. Para isso, utilizou-se os dados obtidos na última avaliação de crescimento (Jun/2013) que foram ajustados ao modelo de Mitscherlich com três parâmetros (equação 21).

$$Y_{IAF} = a_j \left[1 - e^{-c_j(x+b_j)} \right] \quad (21)$$

Em que,

Y_{IAF} = valores médios de IAF ($m^2 m^{-2}$) estimados pelo modelo de Mitscherlich;

a_j , b_j e c_j = parâmetros de ajuste do modelo de Mitscherlich.

3.8.3 Coeficiente de cultura simples (Kc) para cafeeiro arábica

Para a descrição matemática da dependência do Kc de uma lavoura cafeeira em relação IAF foram utilizados os modelos, linear (equação 22); polinomial (equação 23), Logístico (equação 24) e Gompertz (equação 25).

$$Kc_{li} = a_{li} IAF + b_{li} \quad (22)$$

$$Kc_{Po} = a_{Po} IAF^2 + b_{Po} IAF + c_{Po} \quad (23)$$

$$Kc_{Lo} = a_{Lo} \left[1 + b_{Lo} e^{(-c_{Lo} IAF)} \right]^{-1} \quad (24)$$

$$Kc_{Go} = a_{Go} e^{\left[-b_{Go} e^{(-c_{Go} IAF)} \right]} \quad (25)$$

Em que,

$K_{C_{li}}$ = valores de Kc (adimensional) previsto pelo modelo linear;

$K_{C_{P_0}}$ = valores de Kc(adimensional) previsto pelo modelo polinomial;

$K_{C_{L_0}}$ = valores de Kc(adimensional) previsto pelo modelo Logístico.

$K_{C_{G_0}}$ = valores de Kc(adimensional) previsto pelo modelo de Gompertz.

a_{li} e ba_{li} = parâmetros de ajuste da equação linear;

a_{P_0} , b_{P_0} e c_{P_0} = parâmetros de ajuste da equação polinomial;

a_{L_0} , b_{L_0} e c_{L_0} = parâmetros de ajuste do modelo Logístico;

a_{G_0} , b_{G_0} e c_{G_0} = parâmetros de ajuste do modelo de Gompertz;

Os parâmetros dos modelos foram ajustados aos valores observados por meio da ferramenta Solver do aplicativo Microsoft Excel. Os indicadores estatísticos, R^2 (equação 18), RMSE (equação 19) e E_f (equação 20) foram utilizados na avaliação do desempenho dos modelos.

Os valores de IAF também foram relacionados com GDD, utilizando para esse fim, o modelo linear.

3.8.4 Produtividade de café beneficiado (sc ha⁻¹)

Os dados da produtividade média (sc ha⁻¹) obtida ao longo das quatro safras (2010, 2011, 2012 e 2013), foram submetidos a análise de variância conjunta pelo software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). Para descrição da função de produção do cafeeiro, foram selecionados dois modelos matemáticos distintos: o polinômio do segundo grau e o modelo de Mitscherlich (PUKHOSKII; KHOKOHLOV, 2011).

$$Y_p = a_p x^2 + b_p x + c_p \quad (26)$$

Em que,

Y_P = produtividade prevista pelo modelo polinomial (sc ha⁻¹);

a_P , b_P e c_P = parâmetros de ajuste do polinômio;

x = porcentagem dos níveis de adubação recomendada de K e N (%).

$$Y_M = a_M \left[1 - e^{-c_M(x+b_M)} \right] \quad (27)$$

Em que,

Y_M = produtividade prevista pelo modelo de Mitscherlich (sc ha⁻¹);

a_M , b_M e c_M = parâmetros de ajuste do modelo de Mitscherlich.

Os parâmetros dos dois modelos foram ajustados aos valores observados de produtividade e porcentagem dos níveis de adubação por meio da ferramenta Solver do aplicativo Microsoft Excel.

As variações de produtividade, correspondentes a acréscimos unitários da porcentagem dos níveis de adubação recomendada de K₂O e N, em diversos níveis de aplicação da recomendação de K e N, foram estimadas por meio da derivada primeira de cada uma das equações de produtividade consideradas:

$$\frac{dY_P}{dx} = b_P + 2a_P x \quad (28)$$

$$\frac{dY_M}{dx} = \frac{a_M c_M}{e^{c_M(b_M+x)}} \quad (29)$$

Buscando generalizar os resultados obtidos neste estudo, os valores de produtividade previstos pelos dois modelos foram adimensionalizados em

relação ao máximo valor de produtividade previsto em cada um dos modelos ajustados. Os valores máximos de produtividade utilizados na adimensionalização foram calculados de acordo com as seguintes equações:

$$Ym_p = c_p - \frac{b_p^2}{4 a_p} \quad (30)$$

Em que,

Ym_p = Produtividade máxima prevista pelo modelo polinomial (sc ha⁻¹).

$$Ym_M = a_M \quad (31)$$

Em que,

Ym_M = Produtividade máxima prevista pelo modelo de Mitscherlich (sc ha⁻¹).

Desta forma, os valores de produtividade relativa ($Yr \leq 1$) previstos pelos dois modelos foram dados por :

$$Yr_p = \frac{a_p}{Ym_p} x^2 + \frac{b_p}{Ym_p} x + \frac{c_p}{Ym_p} \quad (32)$$

Em que,

Yr_p = produtividade relativa do modelo polinomial do segundo grau.

$$Yr_M = 1 - e^{-c_M(x+b_M)} \quad (33)$$

Em que,

Y_{rM} = produtividade relativa do modelo de Mitscherlich.

3.8.4.1 Análise econômica da função de produção

Para os dois modelos matemáticos de produtividade relativa considerada (equações 32 e 33), foram determinadas a porcentagem da dose recomendada de N+K, que maximiza o valor da margem de contribuição bruta. A margem de contribuição bruta (MCB) foi calculada com uma metodologia semelhante à descrita por Andrade et al. (2012), tomando-se a diferença entre a renda bruta (preço unitário de venda da saca de café beneficiado, vezes a quantidade de sacas produzidas por hectare) e o custo operacional efetivo (soma dos custos variáveis de produção por hectare), conforme indicado na equação 34:

$$MCB_i = (Y_{\max} P_s) Y_{r_i} - \frac{x}{100} C_{NK100} - \sum C_v \quad (34)$$

Onde

MCB_i = Margem de contribuição bruta (R\$ ha⁻¹);

i = índice para identificação do modelo matemático de produção considerado: $i = P$ = polinômio do segundo grau, $i = M$ = Mitscherlich;

Y_{\max} = Produtividade máxima (média do ano de alta e de baixa produção) que seria atingida por uma lavoura livre de restrições de adubação (sc ha⁻¹);

Y_{r_i} = Produtividade relativa correspondente à porcentagem aplicada da recomendação de N e K;

P_s = Preço recebido pela venda de uma saca de café beneficiada (R\$ sc⁻¹);

C_{NK100} = Custo por hectare (incluindo aquisição e aplicação) para atender a recomendação de adubação de N e K (R\$ ha⁻¹);

ΣC_V = Somatória dos demais custos variáveis de produção não relacionados à adubação de N+K (R\$ ha⁻¹).

Para o caso da MCB calculada com o uso da produtividade relativa do modelo polinomial (MCB_P), o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada foi estabelecido com a equação 35:

$$xO_P = \frac{Ym_P}{2a_P} \left(\frac{1}{100} \frac{C_{NK100}}{Y_{max} P_S} - \frac{b_P}{Ym_P} \right) \quad (35)$$

Onde

xO_P = valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K, referente ao modelo polinomial de produtividade (%).

Para o caso da MCB calculada com o uso da produtividade relativa do modelo de Mitscherlich (MCB_M), o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada foi estabelecido com a equação 36:

$$xO_M = \frac{1}{c_M} \ln \left[100 \frac{Y_{max} P_S}{C_{NK100}} \frac{c_M}{e^{c_M b_M}} \right] \quad (36)$$

Onde

xO_M = valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K referente ao modelo de Mitscherlich (%).

Nas equações de cálculo do valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K dos dois modelos de produtividade considerados (equações 35 e 36), foi identificado o termo que representa a quantidade de sacas beneficiadas por hectare, que seria comprometida para cobrir o custo por hectare necessário para atender 100% da recomendação da adubação de N+K.

$$S_{NK100} = \frac{C_{NK100}}{P_s} \quad (37)$$

Onde

S_{NK100} = Custo equivalente por hectare (incluindo aquisição e aplicação) para atender 100% da recomendação de adubação de N +K (sc ha⁻¹);

Desta forma, para o cálculo do valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada N+K dos dois modelos de produtividade, foi possível substituir as inúmeras combinações possíveis de custo por hectare, da aplicação da quantidade total da recomendação da adubação de N+K (C_{NK100}), e preço de venda da saca de café beneficiado (P_s), por um único parâmetro: o custo equivalente (S_{NK100}) da aplicação, em um hectare, de 100% da recomendação da adubação de N +K:

$$xO_P = \frac{Ym_P}{2a_P} \left(\frac{1}{100} \frac{S_{NK100}}{Y_{max}} - \frac{b_P}{Ym_P} \right) \quad (38)$$

$$xO_M = \frac{1}{c_M} \ln \left[100 \frac{Y_{max}}{S_{NK100}} \frac{c_M}{e^{c_M b_M}} \right] \quad (39)$$

Finalmente, para o cálculo do valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada N+K, dos dois modelos de produtividade, foi possível substituir as inúmeras combinações possíveis de custo equivalente por hectare (S_{NK100}), da recomendação de adubação de N+K e produtividade máxima que seria atingida por uma lavoura livre de restrições de adubação (Y_{max}), por um único parâmetro: a fração de comprometimento da produtividade máxima, ou da receita bruta máxima, com o custo aplicação de 100% da recomendação da adubação de N+K.

$$F_{NK100} = \frac{S_{NK100}}{Y_{max}} = \frac{C_{NK100}}{Y_{max} P_s} \quad (40)$$

Onde

F_{NK100} = Fração da produtividade de uma lavoura livre de limitações de adubação, que seria comprometida com o custo equivalente da aplicação de 100% da recomendação de adubação de N+K, ou fração da receita bruta comprometida com o custo da aplicação de 100% da recomendação de adubação de N+K.

Assim, foi possível, para os dois modelos, estabelecer o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K, em função de um único fator (F_{NK100}), que sintetizou os efeitos das inúmeras combinações possíveis de custo por hectare da aplicação de 100% da recomendação da adubação de N+K (C_{NK100}), preço de venda da saca de café beneficiado (P_s) e produtividade máxima que seria atingida por uma lavoura livre de restrições de adubação (Y_{max}):

$$x_{oP} = \frac{Y_{mP}}{2a_P} \left(\frac{F_{NK100}}{100} - \frac{b_P}{Y_{mP}} \right) \quad (41)$$

$$x_{oM} = \frac{1}{c_M} \ln \left[\frac{100}{F_{NK100}} \frac{c_M}{e^{c_M b_M}} \right] \quad (42)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Elementos meteorológicos

No período das avaliações (maio de 2007 a agosto de 2013), a temperatura teve como menor valor médio mensal, 16,7 °C, e valor máximo de 24,9 °C (Gráfico 1). Ávila et al. (2014) relatam que quanto a temperatura média, o Estado de Minas Gerais apresenta influência marcante da latitude e, principalmente, da altitude, em razão da presença de cadeias de montanhas em grande parte de seu território. Assim, os valores médios mensais de temperaturas variam entre 13,0°C (nas regiões mais elevadas, como as das Serras da Mantiqueira e do Espinhaço) e 27,0°C (no norte e leste do Estado).

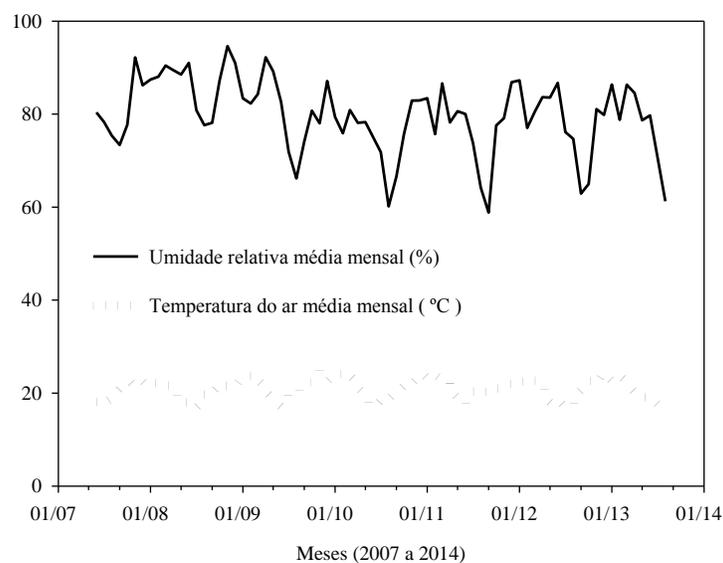


Gráfico 1 Temperatura média mensal do ar (°C) e umidade relativa média mensal do ar (%), entre maio de 2007 e agosto de 2013, da estação meteorológica na área experimental. UFLA, Lavras-MG, 2015

No Gráfico 1, são apresentados também os valores de umidade relativa média mensal do ar, em que se verifica que o seu valor médio para o período avaliado foi 79,7%. Esses resultados aproximam dos resultados obtidos por Brasil (1992), que obteve o valor de 76,0% para a mesma região desse estudo. Essa pequena diferença pode estar atrelada ao tempo de monitoramento da umidade relativa. Os dados de Brasil (1992) foram obtidos a partir da série histórica de 1961 a 1990, enquanto o período avaliado desse estudo foi maio de 2007 a agosto de 2013.

A precipitação média anual acumulada foi de 1.526,2 mm, sendo 86,0% distribuídos nos meses de outubro a março, que corresponde à estação chuvosa local. A lâmina média anual acumulada foi 235,9 mm, com o maior valor ocorrido em 2011, tendo lâmina aplicada de 359,1 mm e o menor valor no ano de 2009, com uma lâmina aplicada de 122,9 mm. O ano de 2009 foi o que apresentou o maior índice pluviométrico anual acumulado com 1.811,5 mm (Gráfico 2).

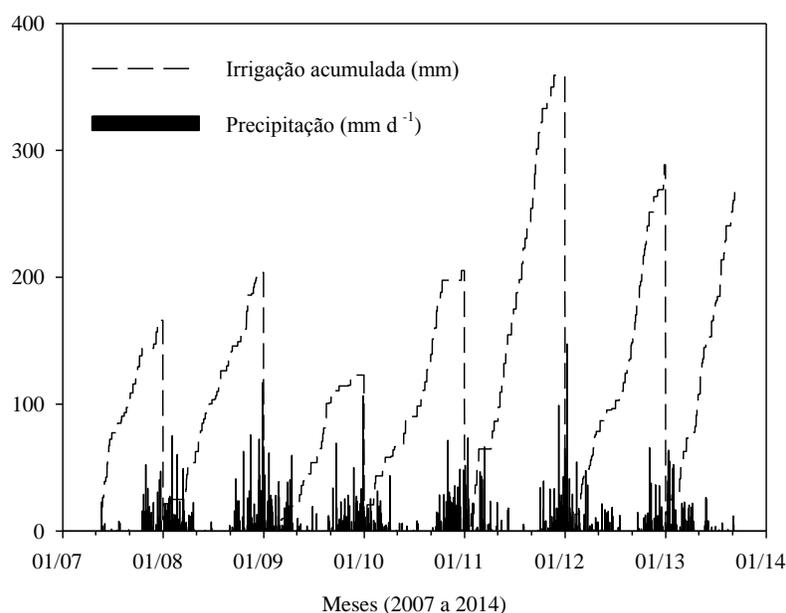


Gráfico 2 Precipitação pluvial média (mm d^{-1}) e irrigação anual acumulada (mm), entre maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

Esses resultados estão de acordo com Brasil (1992), que obteve um valor médio anual para precipitação de 1.530 mm (série histórica de 1961 a 1990) e difere, ficando acima do valor médio de Dantas, Carvalho e Ferreira (2007), que observaram uma precipitação média anual de 1.460 mm (dados climáticos no período de 1991 a 2004) para a mesma região em estudo.

O Gráfico 3 ilustra os dados médios mensais de velocidade de vento a 2,0 m acima da superfície do solo, e evapotranspiração de referência (estimada pela equação de Penman-Monteith/FAO). O valor médio da velocidade do vento a 2,0 m acima da superfície do solo, para os seis anos de estudos, foi de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Os maiores valores médios mensais foram registrados no ano de 2009, sendo

2,3 m s⁻¹, 2,2 m s⁻¹ e 2,4 m s⁻¹ para os meses de janeiro, julho e agosto, respectivamente.

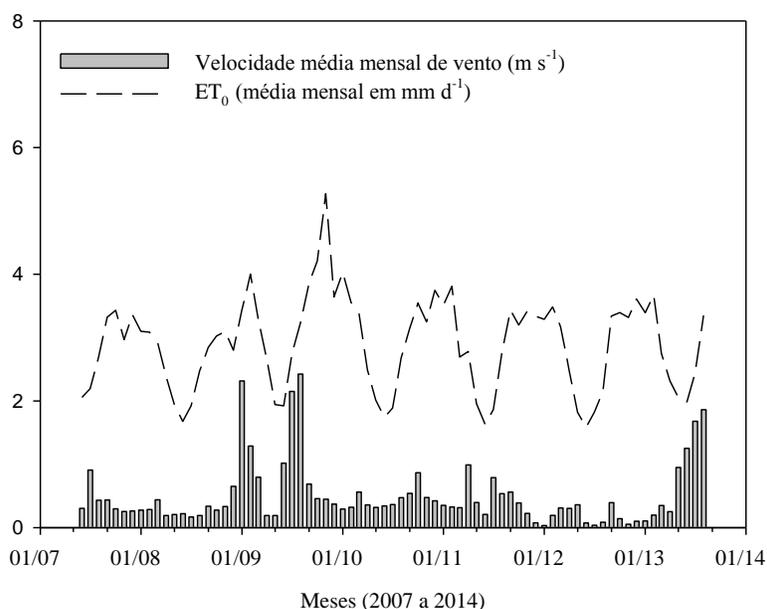


Gráfico 3 Velocidade média mensal de vento (m s⁻¹) a 2,0 m acima da superfície do solo e evapotranspiração mensal de referência (mm d⁻¹), estimada pela equação de Penman-Monteith/FAO, em Lavras, entre maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

Com relação a evapotranspiração de referência, foi verificado um valor médio de 2,9 mm d⁻¹, em que o menor valor médio foi sempre obtido no mês de junho, sendo o valor médio de 1,7; 1,9; 1,7; 1,6; 1,6 e 2,0 mm d⁻¹ para o ano 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013, respectivamente (Gráfico 3).

No mês de junho, também foram observados os menores valores de radiação solar (R_s), em torno de 124, 130, 136, 114 e 127 W m⁻² para o ano 2008, 2009, 2010, 2012 e 2013, respectivamente (Gráfico 4). O que justifica os

menores valores obtidos da ETo sempre no mês de junho, pois, como relatado por Matzenouer, Bergamaschi e Berlato (1998), diminuição do valor de radiação solar, provoca redução na demanda evaporativa, pois a radiação solar é a fonte de energia utilizada no processo de evapotranspiração.

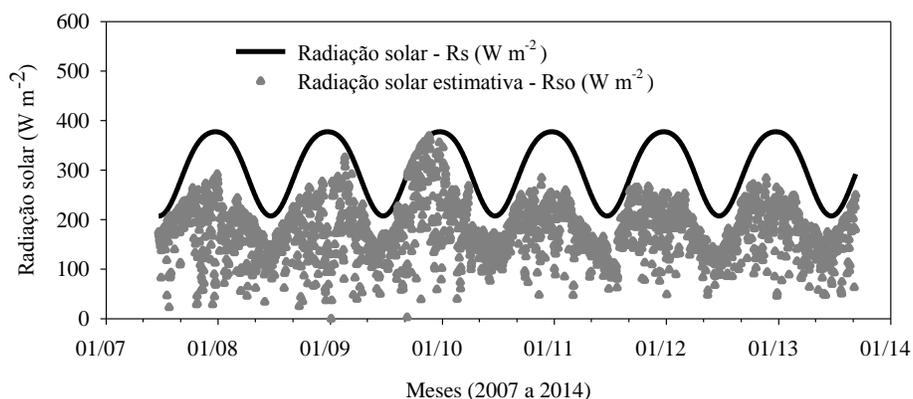


Gráfico 4 Valores médios da Radiação solar (R_s), em $W m^{-2}$ e Radiação solar estimada (R_{so}), em $W m^{-2}$, na cidade de Lavras, entre maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

No ano de 2011, o mês que apresentou o menor valor de R_s foi julho, com $108 W m^{-2}$, no entanto, o mês de junho continuou sendo o mês com o menor valor médio da ETo. Isso ocorreu, uma vez que o mês de junho apresentou menor velocidade de vento ($0,2 m s^{-1}$), menor temperatura do ar ($17,5 ^\circ C$), maior umidade relativa do ar (80,0%), enquanto o mês de julho apresentou respectivamente, $0,8 m s^{-1}$, $20,4 ^\circ C$ e 73,8%. Pois, para um determinado local, quanto menor for a radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento, e quanto maior a umidade relativa do ar, menor deverá ser a taxa de evaporação e transpiração, uma vez que esses parâmetros de clima fornecem energia para vaporização e remoção o vapor d'água da superfície (FIGUEIREDO, 2010).

4.2 Monitoramento de nitrato no extrato saturado do solo (NO_3^-)

Os resultados referentes à análise descritiva para os valores médios de concentração de NO_3^- , no extrato saturado para os diferentes níveis de adubação, podem ser visualizados na Tabela 6, para as profundidades de 0,50 m e 0,90 m, respectivamente.

Nas duas formas de parcelamentos os valores médios dos teores de NO_3^- aumentaram com as elevações nos níveis de adubação (Tabela 6). Na profundidade de 0,50 m a diferença entre os extremos das médias, ou seja, a diferença entre a maior (230%) e menor (30%) média obtida, foi de 115,94 e 96,82 mg L^{-1} para as formas de parcelamento com quatro e doze aplicações, respectivamente. Na profundidade de 0,90 m, fazendo essa mesma análise, obtém-se 157,02 mg L^{-1} para parcelamento com quatro aplicações e quase a metade deste valor para parcelamento com doze aplicações (86,76 mg L^{-1}).

Assim, por meio dos dados médios da concentração NO_3^- , observa-se que existe um indicativo de mesmo padrão de comportamento em relação ao número de parcelamento para a profundidade de 0,50 m (Tabela 6). Nesta profundidade pode existir uma maior atividade das raízes que absorvem água (BARRETO et al., 2006) e nutrientes, desde que haja umidade suficiente no solo o NO_3^- é absorvido mais rapidamente pelas plantas.

Tabela 6 Valores mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados médios de nitrato (NO_3^-), em mg L^{-1} , obtidos bimestralmente entre setembro de 2010 e abril de 2013, amostrados na profundidade de 0,50 m e 0,90 m, sob duas formas de adubações, quatro e doze aplicações de fertilizantes. UFLA, Lavras-MG, 2015

Profundidade de 50 cm								
	4 Aplicações				12 Aplicações			
	30%	80%	130%	230%	30%	80%	130%	230%
Média (mg L^{-1})	23,68	48,39	116,65	139,62	37,09	45,31	97,87	133,91
Mínimo (mg L^{-1})	6,69	7,31	10,46	20,14	21,57	11,05	51,85	46,73
Máximo (mg L^{-1})	57,45	135,00	345,65	415,49	76,05	71,24	181,24	190,83
Desvio padrão (mg L^{-1})	16,48	40,45	98,30	133,92	13,54	15,99	46,65	36,30
Coef. de variação (%)	69,59	83,60	84,27	95,92	36,50	35,29	47,67	27,11
Profundidade de 90 cm								
Média (mg L^{-1})	17,92	48,34	106,14	174,94	34,05	42,38	77,19	120,80
Mínimo (mg L^{-1})	6,20	7,90	18,89	9,67	10,66	6,43	25,20	71,60
Máximo (mg L^{-1})	25,64	106,42	454,69	370,64	69,47	83,13	189,24	202,36
Desvio padrão (mg L^{-1})	4,91	25,83	117,12	129,12	14,51	17,14	46,08	32,87
Coef. de variação (%)	27,41	53,43	110,35	73,81	42,61	40,44	59,71	27,21

A amplitude dos dados (diferença entre valores máximos e mínimos) aumentou com incremento da adubação até o nível 130%, tendo apenas a profundidade de 0,50 m parcelada com 4 aplicações, aumentado com incremento da adubação até o nível de 230% (Tabela 6).

A adubação parcelada com 4 aplicações apresentou maior variabilidade dos dados, os valores de desvio padrão variaram de 16,48 a 133,92 mg L⁻¹ e 4,91 a 129,12 mg L⁻¹ para as profundidades 0,50 m e 0,90 m, respectivamente, com coeficiente de variação de 69,59 a 95,92% para profundidade de 0,50 m e coeficiente de variação de 27,41 a 110,35 % para a profundidade de 0,90 m. Enquanto na adubação com 12 aplicações, os desvios padrão variaram de 13,54 a 46,65 mg L⁻¹ e o coeficiente de variação de 27,11 a 47,67% para profundidade de 0,50 m e para profundidade de 0,90 m, os desvios padrão variaram de 14,51 a 46,08 mg L⁻¹ e o coeficiente de variação de 27,21 a 59,71% (Tabela 6).

Os meses de mar-abr de 2012 e set-out de 2012 (profundidade de 0,50 m), para o parcelamento com doze aplicações e mar-abr de 2012 (profundidade de 0,50 m) e set-out de 2010 (profundidade de 0,90 m) para o parcelamento com quatro aplicações, apresentaram R² abaixo de 0,50, no entanto, verifica-se que para os demais, houve efeito linear para os teores de NO₃⁻ (R² acima de 0,65) no extrato saturado, em função dos níveis de nitrogênio aplicados, tanto para a forma de parcelamento com quatro, quanto para a de doze aplicações nas duas profundidades avaliadas (Gráficos 5 e 6).

Observa-se que no ano de 2012, na profundidade de 0,50 m, não ocorre diferenças expressivas no acréscimo (< 0,06 mg L⁻¹) para cada incremento unitário nos níveis de adubação aplicada, entre as formas de parcelamento com quatro e doze aplicações, sendo que para os demais anos, em ambas as profundidades, no fim do período chuvoso (março-abril) a forma de parcelamento com quatro aplicações, apresenta maiores acréscimos para cada incremento unitário nos níveis de adubação aplicada, enquanto nos meses

anteriores às chuvas (setembro-outubro) ocorre o inverso, com a forma de parcelamento com doze aplicações, que apresenta maiores acréscimos para cada incremento unitário nos níveis de adubação aplicada (Gráficos 5 e 6).

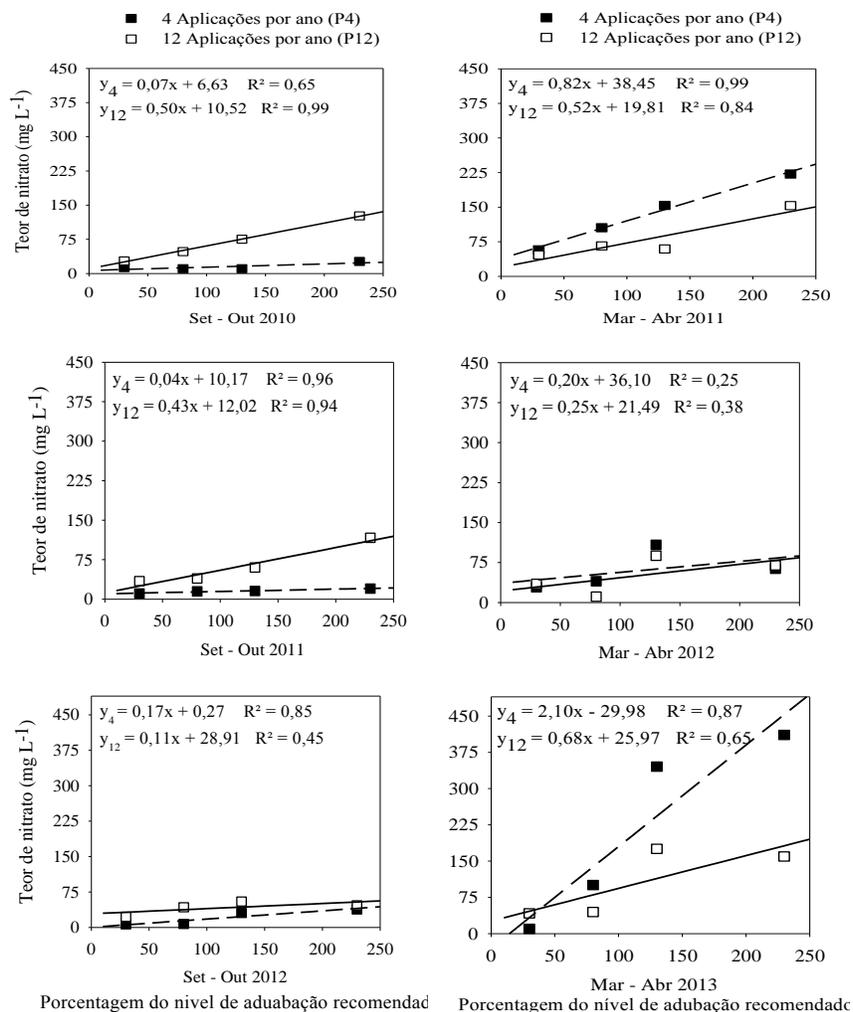


Gráfico 5 Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade de 0,50 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

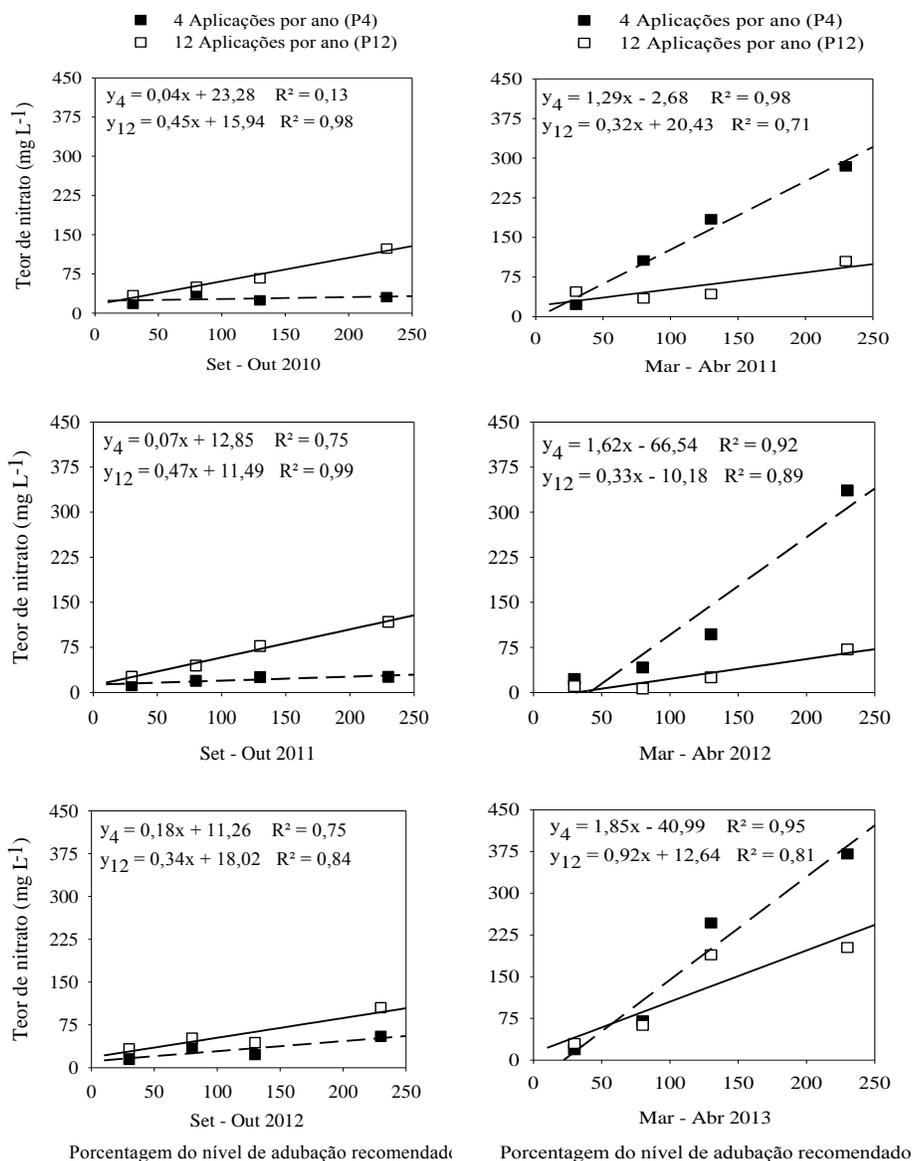


Gráfico 6 Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade de 0,90 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

Na profundidade de 0,90 m, localizada abaixo da profundidade efetiva ($z = 0,6$ m) considerada no manejo de irrigação do experimento, o incremento para cada acréscimo unitário nos níveis de adubação, para o parcelamento com doze aplicações, variaram de 0,34 a 0,47 mg L⁻¹ no início do período chuvoso, e 0,32 a 0,42 mg L⁻¹ no fim do período chuvoso, enquanto o uso do adubo com quatro aplicações anuais promoveu uma variação de 1,29 a 1,85 mg L⁻¹ e 0,04 a 0,17 mg L⁻¹ para o início e fim do período das chuvas, respectivamente (Gráfico 6).

Desta forma, é possível inferir que aplicações de fertilizantes via fertirrigação, concentradas em menor período (quatro vezes ao ano no período das chuvas entre Nov. e Fev.), causam maior lixiviação de NO₃⁻ para a camada de 0,90 m, que está localizada abaixo do sistema radicular efetivo do cafeeiro.

Isso ocorre porque além das maiores quantidades de adubo aplicadas em menor período, as aplicações se concentram numa época em que além da irrigação existe uma maior concentração de chuvas. Tal fato pode induzir uma movimentação mais rápida do NO₃⁻ para camadas mais profundas.

Nos Gráficos 7 e 8 é possível visualizar a distribuição temporal da concentração de NO₃⁻ na solução no solo, corrigida para o valor equivalente do extrato saturado do solo, na profundidade de 0,50 m (Gráfico 7) e 0,90 m (Gráfico 8).

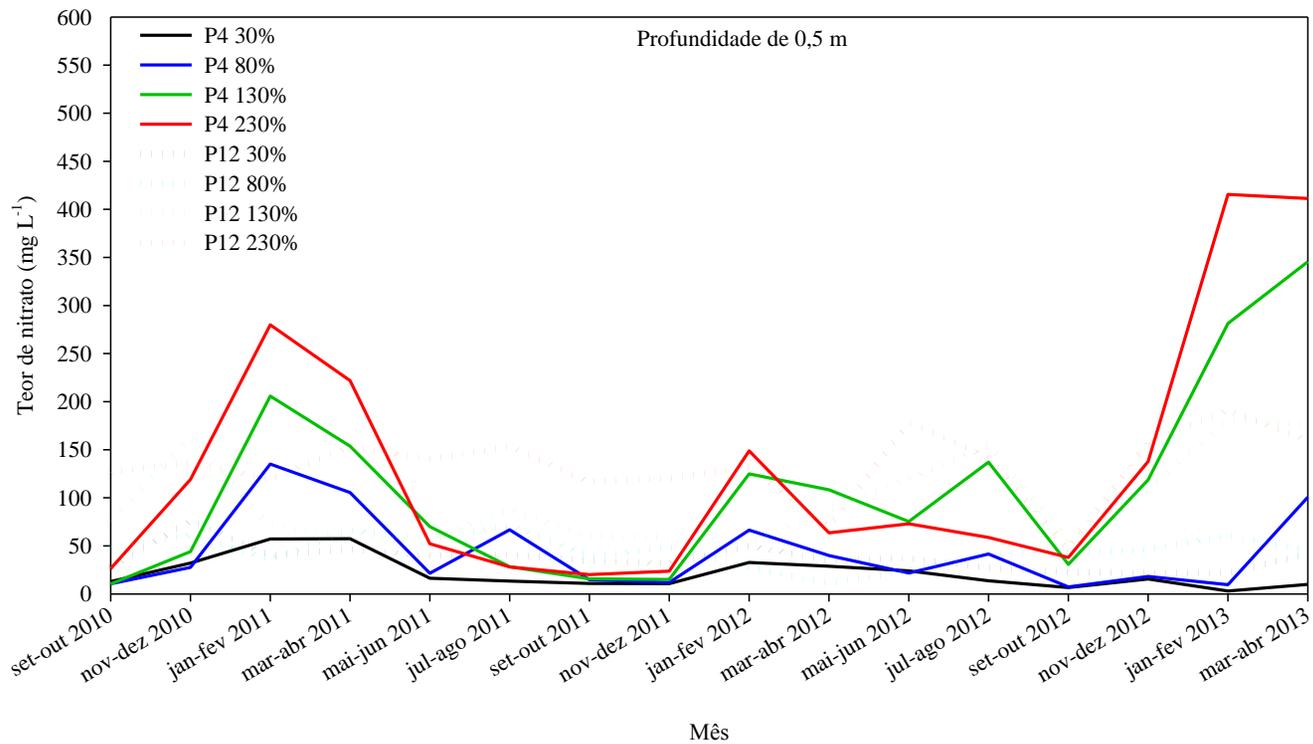


Gráfico 7 Concentração média de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidades 0,50 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

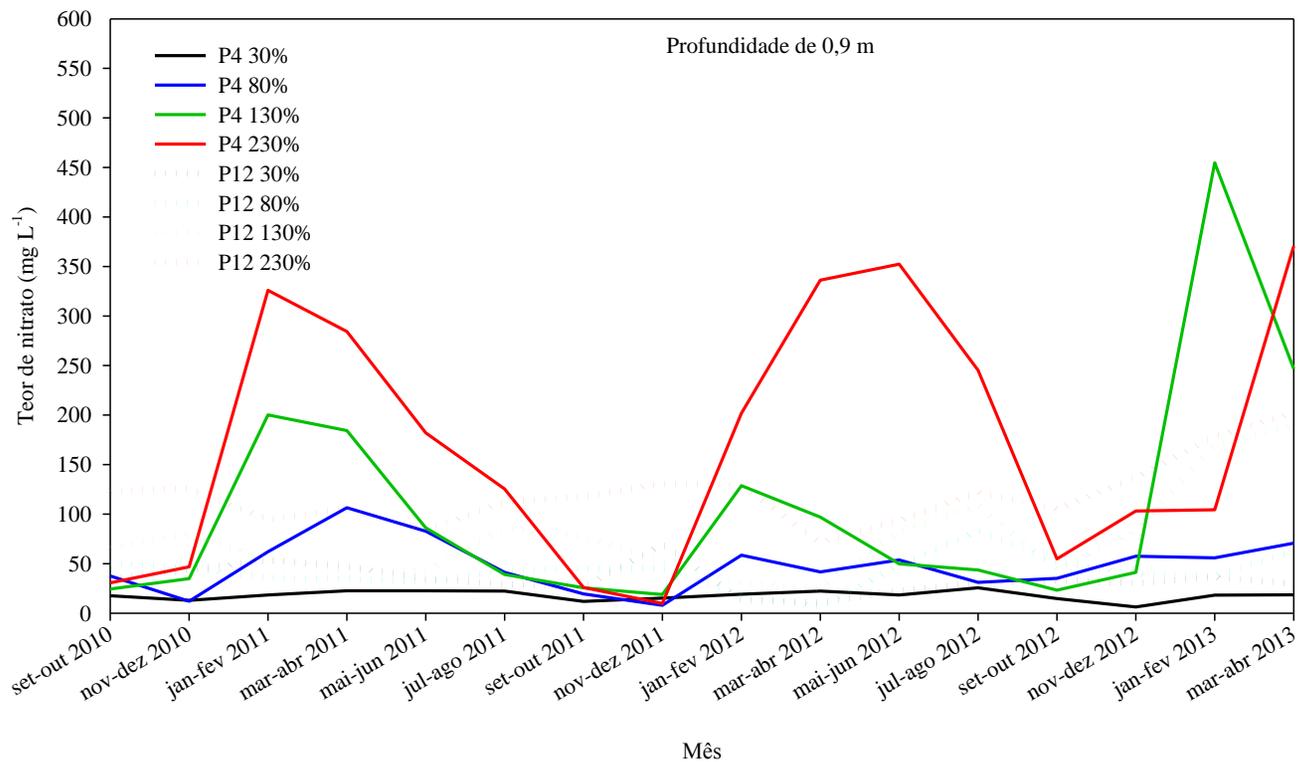


Gráfico 8 Concentração média de nitrato (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidades 0,90 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

De maneira geral, o monitoramento do teor de NO_3^- no extrato saturado, detectou um aumento significativo nos teores de NO_3^- na medida em que se aumenta a quantidade de adubo aplicado. A forma de parcelamento afeta a distribuição temporal do teor de NO_3^- , em ambas as profundidades, apresentando picos nos valores de concentração no parcelamento com quatro aplicações/ano, enquanto no parcelamento com 12 aplicações/ano, não se observou ao longo do tempo, uma tendência definida de elevação do teor de NO_3^- no extrato saturado do solo, em quaisquer das profundidades para os diferentes níveis de adubação (Gráficos 7 e 8).

Andrade Neto et al. (2008), ao estudarem a concentração de NO_3^- na solução do solo, em função da aplicação de nitrato de cálcio e ureia, detectaram um aumento significativo nos teores de NO_3^- à medida que se aumenta a concentração da fonte nitrogenada na água de irrigação. Alves et al. (2008) demonstraram que as diferentes fontes nitrogenadas de fertirrigação não tiveram efeitos significativos sobre a concentração de NO_3^- , no extrato de saturação e na solução do solo, ao longo de um ciclo da bananeira.

4.3 Monitoramento de Potássio no extrato saturado do solo (K^+)

Em relação a distribuição dos dados de K^+ do extrato saturado do solo, a amplitude dos dados aumentou com incremento da adubação. Assim, a dose de 30% e 230% apresentou a menor e a maior diferença numérica entre o valor máximo e mínimo, respectivamente, para ambas as formas de parcelamentos e profundidades do solo (Tabela 7).

A 0,50 m de profundidade, os valores de desvio padrão dos tratamentos variaram de 1,66 a 33,92 mg L^{-1} e 2,59 a 13,44 mg L^{-1} para a adubação parcelada com quatro e doze aplicações por ano, respectivamente, com coeficiente de variação de 59,12 a 97,47% para a adubação parcelada, com quatro aplicações

no ano (P4), e coeficiente de variação de 58,93 a 93,20 % para a adubação com doze aplicações no ano (P12) (Tabela 7).

Tabela 7 Valores mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados médios de potássio (K^+), em $mg L^{-1}$, obtidos bimestralmente entre setembro de 2010 e abril de 2013, amostrados na profundidade de 0,50 m e 0,90 m, sob duas formas de adubações, quatro e doze aplicações de fertilizantes. UFLA, Lavras-MG, 2015

Profundidade de 50 cm								
	4 Aplicações				12 Aplicações			
	30%	80%	130%	230%	30%	80%	130%	230%
Média ($mg L^{-1}$)	2,82	7,68	26,39	42,79	4,40	5,87	12,70	16,03
Mínimo ($mg L^{-1}$)	0,81	1,18	3,30	6,75	1,68	0,54	1,82	2,22
Máximo ($mg L^{-1}$)	6,24	26,28	61,80	119,86	11,78	17,54	35,84	38,11
Desvio padrão ($mg L^{-1}$)	1,66	7,48	16,10	33,92	2,59	5,01	11,83	13,44
Coef. de variação (%)	59,12	97,47	61,00	79,27	58,93	85,20	93,20	83,83
Profundidade de 90 cm								
Média ($mg L^{-1}$)	1,36	8,51	25,08	44,41	5,16	2,68	12,93	8,54
Mínimo ($mg L^{-1}$)	0,46	0,77	2,30	5,85	1,52	0,49	2,74	0,51
Máximo ($mg L^{-1}$)	4,08	19,72	62,56	85,56	13,56	17,46	29,72	36,26
Desvio padrão ($mg L^{-1}$)	0,97	6,28	19,17	26,08	3,63	4,05	8,14	11,69
Coef. de variação (%)	71,51	73,80	76,45	58,73	70,26	151,13	63,00	136,99

Na profundidade de 0,90 m, o coeficiente de variação foi de 58,73 a 76,45% (P4) e 63,00 a 151,13% (P12) (Tabela 7).

Na profundidade de 0,50 m houve aumento dos valores médios dos teores K^+ com as elevações nos níveis de adubação para as duas formas de parcelamentos. Na profundidade de 0,90 m houve elevação dos valores médios dos teores de K^+ com os incrementos nos níveis de adubação apenas para o P4. No P12 houve oscilações nos valores médios dos teores de K^+ com acréscimo dos níveis da adubação (Tabela 7).

Essas oscilações nos dados no P12, na profundidade de 0,90 m, parte pode ser explicado pela mobilidade desse nutriente no solo, o que de certa forma vai influenciar na ocorrência ou não de perdas por lixiviação e/ou percolação. Entretanto outro fato que pode evidencia a elevação dos teores deste nutriente é a quantidade de adubo aplicada e o requerimento do nutriente pelas plantas, uma vez que as plantas apresentaram crescimento e produções distintas.

Segundo Kepkler e Anghinoni (1996) a mobilidade dos nutrientes no perfil pode afetar a disponibilidade destes aos vegetais, e também as perdas por lixiviação e, por isso, influencia a escolha das técnicas mais adequadas de fertilização do solo, incluindo épocas, doses e métodos de aplicação dos fertilizantes, tanto sob o ponto de vista agrônômico quanto ambiental (ERNANI et al., 2007).

Houve efeito linear para os teores de K^+ (R^2 acima de 0,50), no extrato saturado, em função dos níveis de potássio aplicados no parcelamento com quatro aplicações nas duas profundidades avaliadas (Gráficos 9 e 10). As formas de parcelamento com quatro aplicações apresentaram acréscimos de 0,22 a 0,61 $mg L^{-1}$ (profundidade de 0,50 m) e 0,24 a 0,40 $mg L^{-1}$ (profundidade de 0,90 m) para cada incremento unitário nos níveis de adubação aplicada no fim do período chuvoso (março-abril) e 0,03 a 0,05 $mg L^{-1}$ na profundidade de 0,50 m e 0,08 a

0,12 mg L⁻¹ na profundidade de 0,90 m nos meses que antecede o período das chuvas (set-out) (Gráficos 9 e 10).

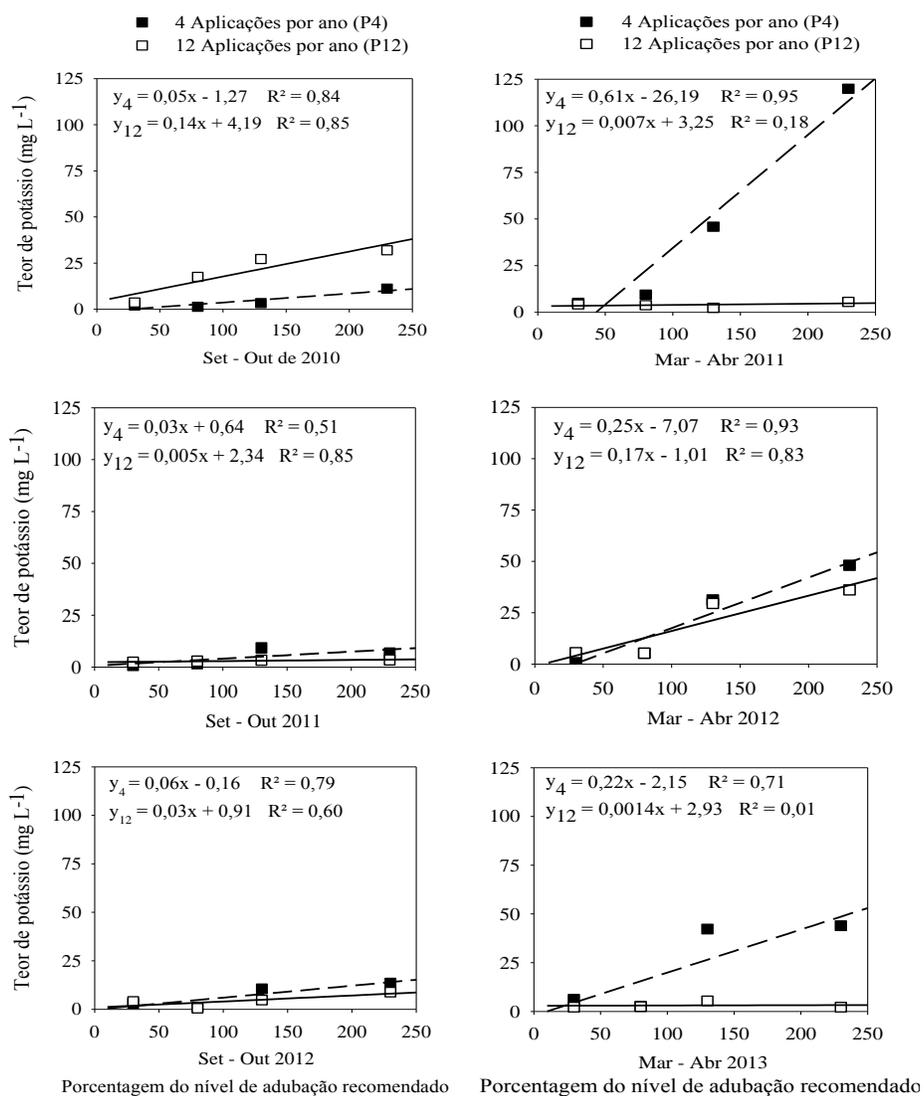


Gráfico 9 Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de potássio (mg L⁻¹) no extrato saturado, na profundidade de 0,50 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

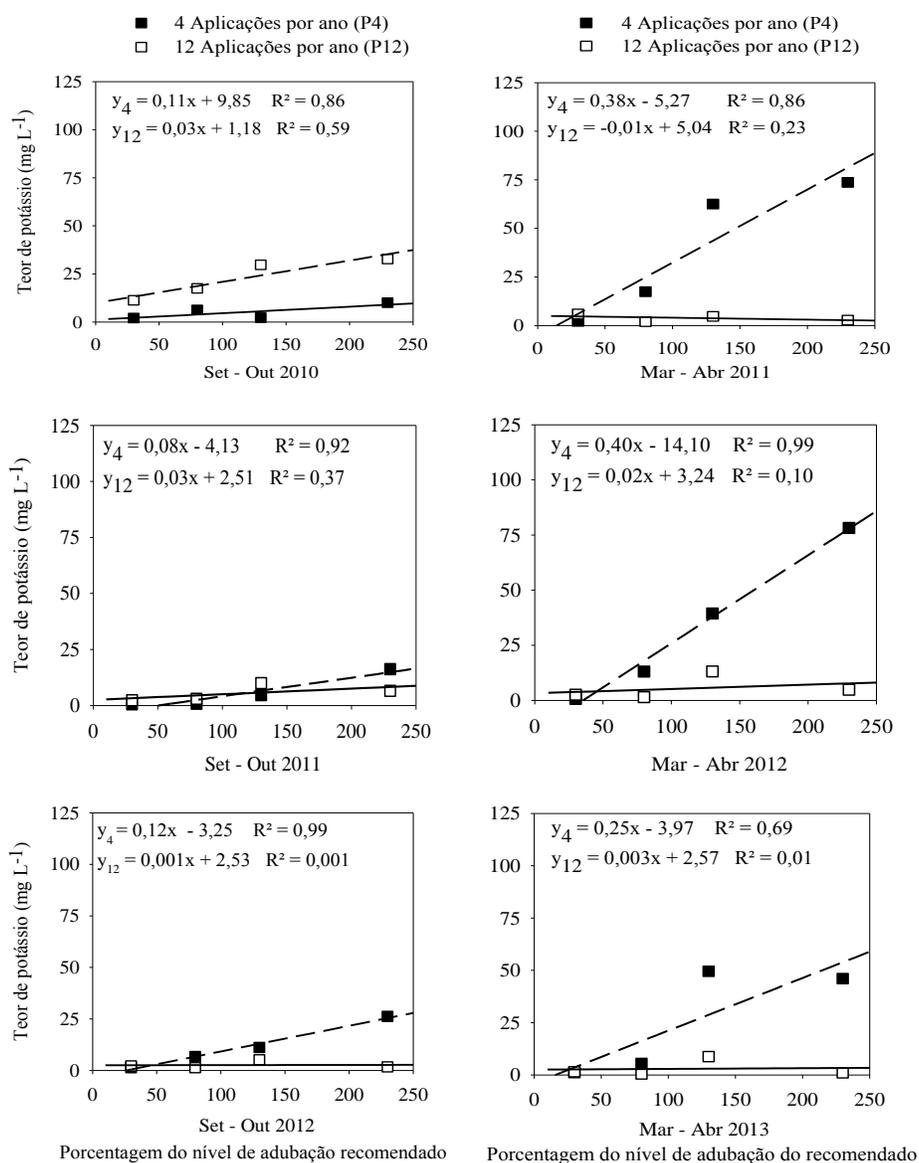


Gráfico 10 Influência dos níveis de adubação (% do recomendado) nos valores médios de potássio (mg L⁻¹) no extrato saturado, na profundidade de 0,90 m, para os meses de setembro-outubro de 2010, março-abril de 2011, setembro-outubro de 2011, março-abril de 2012, setembro-outubro de 2012 e março-abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

Na profundidade de 0,50 m a forma de parcelamento com 12 aplicações apresentou acréscimo de $0,14 \text{ mg L}^{-1}$ nos meses de set-out de 2010 e $0,17 \text{ mg L}^{-1}$ nos meses de mar-abr 2012, e nos demais períodos os incrementos não foram significativos com elevações nos níveis de adubações ficando abaixo de $0,03 \text{ mg L}^{-1}$ (Gráficos 9 e 10).

Na profundidade de 0,90 m, a forma de parcelamento com 12 aplicações não apresentou acréscimo significativo com elevações nos níveis de adubações ($>0,03 \text{ mg L}^{-1}$).

Essa discrepância nos dados, ocorrida nos meses de set-out 2010 e mar-abr 2012, para a forma de parcelamento com 12 aplicações na profundidade de 0,50 m, provavelmente aconteceram devido as quantidades de adubo utilizadas, já que nos anos de 2010 e 2012, as quantidades de fertilizante recomendadas para 100% da dose recomendada para o cafeeiro na fase de produção foram: 431 e $772 \text{ KNO}_3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Enquanto nos ano 2011, a quantidade foi de $171 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e no ano de 2012 foi $227 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, conforme descrito na Tabela 3.

Desta forma, observa-se que em relação ao aumento do incremento da dose de adubação para as duas formas de parcelamento (quatro e doze aplicações), o K^+ apresentou comportamento similar ao íon NO_3^- , em que as maiores aplicações de adubação (acima de 80% da dose da adubação recomendada), concentradas em menor período (quatro vezes ao ano no período das chuvas entre Nov. e Fev.), causaram maior lixiviação também do íon K^+ .

Paglia et al. (2007) ao estudar a influência das doses de K^+ na lixiviação do solo, observaram um aumento nas concentrações do K^+ além de Al^{3+} na solução lixiviada, com a elevação das doses de K_2O aplicadas, assim como Ernani et al. (2007), ao aplicar KCl sobre a superfície do solo, notou a percolação de K^+ para profundidades superiores a 0,10 m, além do aumento da lixiviação decorrente da adição do fertilizante potássico.

Os Gráfico 11 e 12 ilustram a distribuição temporal dos teores de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado do solo, para as profundidades avaliadas (0,5 e 0,9 cm), nos diferentes tratamentos, 4 e 12 aplicações/ano e 30, 80, 130 e 230% da dose recomendada por Guimarães et al. (1999).

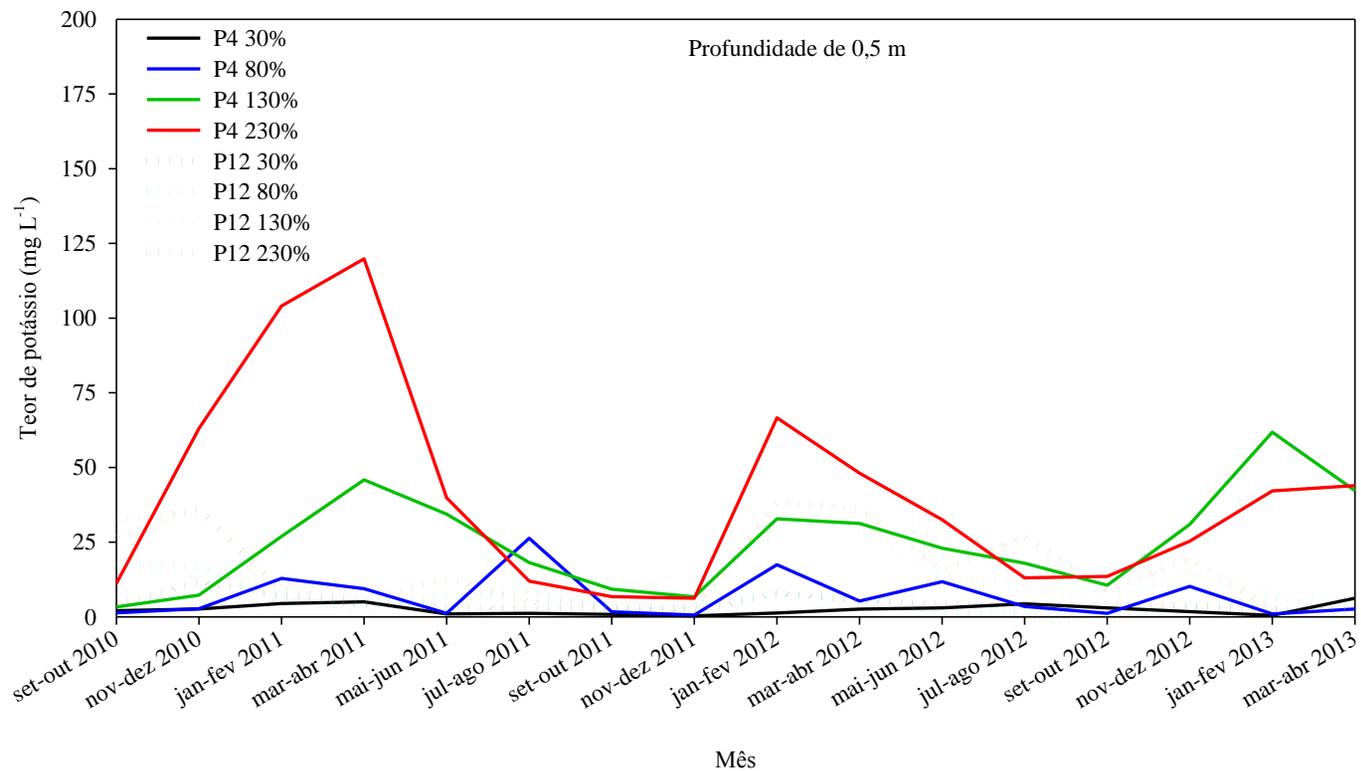


Gráfico 11 Concentração média de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade 0,50 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015

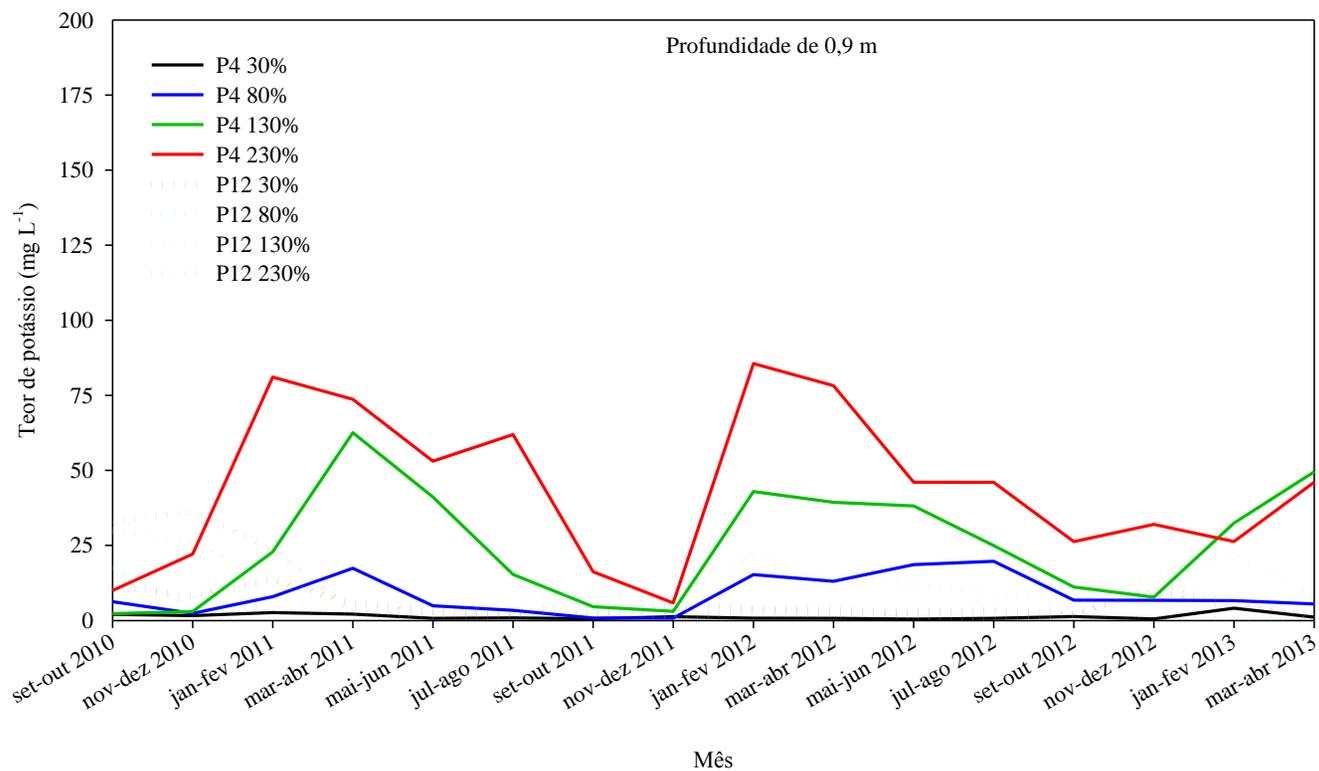


Gráfico 12 Concentração média de potássio (mg L^{-1}) no extrato saturado, na profundidade 0,90 m, nas parcelas que receberam diferentes níveis (30, 80, 130 e 230%) de adubação em duas formas de parcelamentos (4 e 12 aplicações), entre setembro de 2010 e abril de 2013. UFLA, Lavras-MG, 2015.

Verifica-se que no período em estudo (setembro de 2010 a abril de 2013), no parcelamento com quatro aplicações, o monitoramento do teor de K^+ no extrato saturado, detecta uma elevação nos teores K^+ com o aumento na quantidade de adubo aplicado. Na forma de parcelamento com 12 \aplicações aconteceram oscilações, e nem sempre o maior nível de adubação é o que apresenta o maior teor de K^+ no extrato saturado (Gráficos 11 e 12).

4.4 Índice de área foliar (IAF)

Os resultados referentes à análise de variância são apresentados na Tabela 8. Verifica-se que todas as fontes de variação, com exceção do parcelamento, dos blocos e da interação bloco*época, apresentaram efeitos significativos pelo teste F ($P < 0,05$).

Tabela 8 Análise de variância para o índice de área foliar do cafeeiro, cultivar ‘Catiguá MG-3’, avaliado em duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com diferentes níveis de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%) ao longo do tempo (entre janeiro de 2010 e abril de 2013). UFLA, Lavras-MG, 2015

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Parc	1	0,436390	0,436390	0,770	0,3932 ^{NS}
Bloco(Parc)	4	6,723436	1,680859	2,966	0,0521 ^{NS}
Dose	4	76,377034	19,094258	33,696	0,0000*
Parc*Dose	4	8,358127	2,089532	3,687	0,0260*
Erro 1	16	9,066532	0,566658		
Epoca (ep)	20	512,573812	25,628691	1058,30	0,0000*
Bloco*ep	40	1,364585	0,034115	1,409	0,0569 ^{NS}
ep*Parc	20	1,814884	0,090744	3,747	0,0000*
ep*Dose	80	30,593352	0,382417	15,791	0,0000*
ep*Parc*Dose	80	4,842010	0,060525	2,499	0,0000*
erro 2	380	8,718015	0,024217		
Total	629	660,868178			

^{NS} O teste não foi significativo. * Valores significativos pelo teste F, ao nível 5% de significância.

Esse resultado corrobora com os obtidos por Coelho et al. (2004), que avaliaram diferentes parcelamentos da adubação por fertirrigação, adubação convencional, época de irrigação e testemunha sem irrigação para o cafeeiro arábica, e os parcelamentos em quatro, doze, vinte e quatro e trinta e seis vezes não diferiram entre si. Arantes et al. (2006) constataram que o crescimento do cafeeiro foi influenciado pela irrigação, mas não foi pelo parcelamento da fertirrigação após a recepa.

Apesar do parcelamento da adubação não ter proporcionado variações no crescimento do cafeeiro, a sua escolha deve ser feita de forma criteriosa, levando em consideração os aspectos do solo, o aproveitamento dos nutrientes pela cultura e a durabilidade do sistema, principalmente no caso do sistema de irrigação localizada por gotejamento.

Verifica-se também, por meio da Tabela 8, que a interação tripla foi significativa, assinalando que o índice de área foliar se comporta de forma distinta na presença das duas formas de parcelamentos de adubação, sob os diferentes níveis de adubação e épocas de avaliações. Desta forma, fez-se o desdobramento das épocas de avaliações dentro de cada combinação dos parcelamentos com os diferentes níveis de adubação (Tabela 9).

A análise do desdobramento do IAF (Tabela 9), para ajuste do modelo Logístico e Gompertz, apresentou efeitos significativos pelo teste F, ao nível de 1% de significância ($P < 0,01$) em todas as situações testadas. Assim, foi realizada a descrição matemática entre o índice de área foliar e as épocas de avaliação, considerando cada combinação dos parcelamentos com as diferentes doses recomendadas de adubação. As estimativas dos parâmetros dos modelos Logístico e Gompertz, e os indicadores estatísticos RMSE, E_f e R^2 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 Análise de variância referente ao desdobramento das épocas de avaliação dentro de cada combinação das formas de parcelamentos (P4 e P12) com os diferentes níveis de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%), apresentando os números de graus de liberdade (GL), os valores dos quadrados médios (QM) para o índice de área foliar do cafeeiro, cultivar ‘Catiguá MG-3’, considerando os ajustes do modelo Logístico e Gompertz. UFLA, Lavras-MG, 2015

FV	GL	Logístico QM	Gompertz QM
(Epoca/ P4 e 30%)	20	0,9253**	0,9253**
Regressão	3	5,7338**	5,7128**
Desvio	17	0,07676**	0,0805**
(Epoca/ P4 e 80%)	20	2,0854**	2,0854**
Regressão	3	13,7212**	13,7133**
Desvio	17	0,03198 ^{NS}	0,0334 ^{NS}
(Epoca/ P4 e 130%)	20	2,8172**	2,8172**
Regressão	3	18,4515**	18,4706**
Desvio	17	0,0581**	0,0548**
(Epoca/ P4 e 180%)	20	4,4341**	4,4341**
Regressão	3	29,1398**	29,1548**
Desvio	17	0,0743**	0,0716**
(Epoca/ P4 e 230%)	20	3,2393**	3,2393**
Regressão	3	21,1816**	21,1621**
Desvio	17	0,0730**	0,0765**
(Epoca/ P12 e 30%)	20	0,9799**	0,9799**
Regressão	3	6,1013**	5,9299**
Desvio	17	0,0671**	0,1064**
(Epoca/ P 12 e 80%)	20	2,0386**	2,0386**
Regressão	3	13,3867**	13,3789**
Desvio	17	0,0359 ^{NS}	0,0373 ^{NS}
(Epoca/ P 12 e 130%)	20	3,7523**	3,7523**
Regressão	3	24,3725**	24,4581**
Desvio	17	0,1134**	0,0983**
(Epoca/ P 12 e 180%)	20	3,1245**	3,1245**
Regressão	3	24,3725**	20,0598**
Desvio	17	0,1171**	0,1359**
(Epoca/ P 12 e 230%)	20	4,0946**	4,0946**
Regressão	3	26,7827**	26,7150**
Desvio	17	0,0909**	0,1028**

^{NS} O teste não foi significativo. ** Valores significativos pelo teste F, ao nível 1% de significância.

Tabela 10 Parâmetros dos modelos Logístico e Gompertz, e os indicadores, RMSE, E e R², para as duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com os diferentes níveis de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%) definidos a partir dos dados observado ao longo do tempo (entre janeiro de 2010 e abril de 2013). UFLA, Lavras-MG, 2015.

	Tratamento	Indicadores estatísticos			Parâmetros dos modelos			
		RMSE	E _f	R ²	c _L	b _L	a _L	
Modelo Logístico (equação 16)	P4	30	0,1439	0,9999	0,9295	0,0023	10,9718	3,6477
		80	0,0929	0,9999	0,9870	0,0013	10,1703	6,8934
		130	0,1252	0,9999	0,9825	0,0017	13,2344	6,3806
		180	0,1416	0,9999	0,9858	0,0015	16,7022	9,2529
		230	0,1404	0,9999	0,9808	0,0011	12,1956	11,3252
	P12	30	0,1434	0,9999	0,9339	0,0011	5,3512	5,7321
		80	0,0985	0,9999	0,9850	0,0013	9,1849	7,2756
		130	0,1749	0,9999	0,9743	0,0015	13,7078	8,4623
		180	0,1778	0,9999	0,9681	0,0012	14,8611	10,2304
		230	0,1566	0,9999	0,9811	0,0011	17,3531	14,4793
Modelo Gompertz (equação 17)	P4		RMSE	E _f	R ²	c _G	b _G	a _G
		30	0,1473	0,9999	0,9261	0,0016	4,0799	3,8298
		80	0,0949	0,9999	0,9864	0,0007	3,1638	8,3832
		130	0,1216	0,9999	0,9835	0,0008	3,5163	8,8331
		180	0,1390	0,9999	0,9863	0,0008	3,9316	11,7120
		230	0,1436	0,9999	0,9799	0,0006	3,2623	12,8709

“Tabela 10, conclusão”

Tratamento		Indicadores estatísticos			Parâmetros dos modelos			
		RMSE	E_f	R^2	c_G	b_G	a_G	
Modelo Gompertz (equação 17)	P12	30	0,1694	0,9999	0,9077	0,0008	2,6586	6,3985
		80	0,1003	0,9999	0,9844	0,0007	2,9773	9,3798
		130	0,1629	0,9999	0,9777	0,0010	3,9176	8,8240
		180	0,1915	0,9999	0,9630	0,0006	3,5573	12,9928
		230	0,1666	0,9999	0,9787	0,0006	3,6169	16,7605

Verifica-se que houve um desempenho satisfatório para os modelos utilizados, sendo comprovados pelos valores baixos de RMSE, uma vez que quanto menores os valores absolutos de RMSE, melhor o ajuste do modelo. Os altos valores do coeficiente de determinação (R^2), acima de 0,90, e a eficiência do modelo igual a 0,9999, reafirmam o bom desempenho dos modelos Logístico e Gompertz (Tabela 10).

Portanto, os dois modelos considerados apresentaram bons ajustes, e segundo os avaliadores de qualidade podem ser aplicados para descrever o índice de área foliar do cafeeiro ao longo do tempo. Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Pires e Calegario (2007), que ao compararem os modelos lineares e não lineares na descrição do crescimento de plantas, concluíram que o Logístico foi o melhor modelo não-linear, e o Gompertz pode ser utilizado com segurança, sendo superior ao modelo de Weibull.

Pereira et al. (2014) avaliaram as variáveis altura de planta por meio dos modelos não lineares (Logístico e Gompertz), ambos em função das diferentes densidades de plantio, 3333 e 10000 plantas ha^{-1} , e regimes de irrigação (sem irrigação, 20 kPa e 60 kPa) ao longo do tempo, e concluíram que o modelo Gompertz é o que melhor representa o crescimento em altura de plantas do cafeeiro

Tanto o modelo de Gompertz quanto o modelo Logístico, apresentaram valores coerentes para as estimativas dos parâmetros das equações que descreve o crescimento dos cafeeiros cultivar 'Catiguá MG-3'. Observa-se que os valores obtidos para o índice de maturidade, parâmetro K, são bem próximos, apresentando uma pequena diferença ($\geq 0,006$) entre os níveis de adubações, utilizadas para a forma de parcelamento em 12 aplicações ao ano. Na forma de parcelamento com quatro aplicações ao ano, também foi constatada essa

pequena diferença ($\geq 0,006$) entre os níveis de 80%, 130%, 180% e 230% (Tabela 10).

Em relação ao α , nota-se que houve uma resposta crescente em função do aumento nas doses de adubação, independente das formas de parcelamento, para ambos os modelos (Tabela 10).

A partir dos resultados constata-se também que o manejo de adubação com doze aplicações, proporciona incrementos mais acentuados no índice de área foliar, conforme pode ser observado por meio do parâmetro α , que sempre atingiu valores maiores neste manejo (Tabela 10), em ambos os modelos. Este é um indicativo que mesmo apresentando crescimento mais intenso na época das águas (ALVES; LIVRAMENTO, 2003), o cafeeiro sem restrição de água e nutrientes (N e K_2O), pode apresentar incrementos significativos de crescimento durante todo o ano.

Além disso, durante o período das águas, os fertilizantes, ao serem ministrados em grandes quantidades, ficam suscetíveis à perdas por lixiviação, conforme dados obtidos e discutidos no item 4.2, em que o manejo com 4 fertirrigações/ano durante o período das chuvas causam maior lixiviação de NO_3^- e K^+ .

Também foi feita a descrição do índice de área foliar (IAF) em função das doses de adubação (Gráfico 13). O modelo Mitcherlich foi escolhido por ser mais adequado, uma vez que a Lei de Mitcherlich ou dos incrementos decrescentes, delineiam que apesar do aumento na variável resposta com o incremento do nível de adubação, esse aumento não acontece de forma proporcional, e isso foi observado na resposta do Índice de área foliar (IAF) em função dos níveis de N e K_2O .

O acréscimo no IAF foi de 2,23 (30 e 230%), 1,35 (80 e 230%), 0,79 (130 e 230%) e 0,71 $m^2 m^{-2}$ (180 e 230%) para o manejo de adubação com doze aplicações ao ano e 2,23 (30 e 230%), 1,09 (80 e 230%) e 0,61 (130 e 230%)

para o manejo de adubação com quatro aplicações, que apresentou decréscimo de $-0,71\text{m}^2\text{ m}^{-2}$ entre 180% e 230% (Gráfico 13).

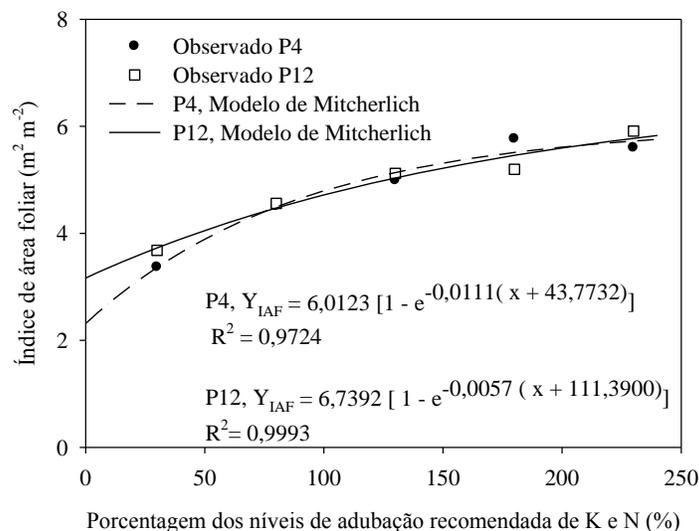


Gráfico 13 Médias dos valores de índice de área foliar ($\text{m}^2\text{ m}^{-2}$) da última avaliação de crescimento (Jun/2013) para cafeeiros fertirrigados em duas formas de parcelamentos de adubação (P4 e P12), sob diferentes níveis de adubação (30, 80, 130, 180 e 230%). UFLA, Lavras-MG, 2015

Os menores níveis de aplicação de N e K_2O (30% e 80%) foram insuficientes para promover o mesmo padrão de crescimento das plantas em relação às demais doses utilizadas, porém, a aplicação de doses entre 130 e 230% não promoveram diferenças expressivas no Índice de área foliar ($< 0,8\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$) dos cafeeiros fertirrigados em quatro e doze parcelamentos (Gráfico 13). Esses resultados estão de acordo com a recomendação de Santinato e Fernandes (2002), que sugerem um acréscimo de 30% na dose de adubação em lavouras irrigadas de café em produção.

Sobreira et al. (2011) não encontraram diferenças significativas no crescimento de plantas fertirrigadas em aplicações de níveis de adubação, variando entre 70 e 190% para cafeeiros em fase de formação, o que significou uma economia de 30% com N e K_2O e maior eficiência com o uso da fertirrigação. No entanto, Carelli, Fahl e Magalhães (1989) relataram que cafeeiros em fase de frutificação apresentaram maior absorção de nutrientes, assim como maior taxa de fotossíntese, sugerindo que na presença de frutos, as plantas tornam-se metabolicamente mais ativas.

Na lavoura em produção, a demanda nutricional pode ser maior, pois parte dos nutrientes das folhas é redistribuída para os frutos e, portanto, aumento nos níveis de adubação pode ser indicado como forma de aumentar a produtividade sem prejuízo ao crescimento. Neste caso a eficiência da fertirrigação pode estar relacionada ao aproveitamento de maiores doses de N e K_2O , e não na economia de aplicação como verificado na fase de formação.

4.5 Coeficiente de cultura único (Kc)

No Gráfico 14, encontram-se os valores médios de tensão de água no solo medido pelos tensiômetros nas profundidades de 0,10, 0,25, 0,40 e 0,60 m entre os meses de maio de 2007 e agosto de 2013. Observa-se que os dados médios de tensão de água no solo, oscilam ao longo do tempo, e os tensiômetros localizados a 0,10 e 0,25 m de profundidade, apresentaram picos, alcançando a tensão de 611,83 cm.c.a (60 kPa), principalmente o tensiômetro a 0,10 m, que apresenta essas elevações com maior frequência entre os meses de maio de 2007 e agosto de 2013(Gráfico 14).

Isso aconteceu possivelmente por que nas camadas superiores do solo se concentra a maior parte do sistema radicular do cafeeiro, conforme relata Rena e Guimarães (2000) em uma revisão sobre o assunto, que o sistema radicular do

cafeeiro apresenta 90% de suas raízes absorventes na camada de 0-0,3 m do solo. O que pode ter levado às reduções do teor de água no solo, devido a sua extração por meio do sistema radicular da cultura.

Ronchi et al. (2015) ao avaliarem as respostas morfológicas do sistema radicular de quatro cultivares de café arábica, submetidas a diferentes arranjos espaciais, também observaram que as proporções de raízes nas profundidades superficiais (0,1 m), são maior que aquelas verificadas nas camadas mais inferiores do solo (0,4 m), para os espaçamentos de 0,40, 0,50, 0,60, 0,70 e 0,80 m, entre plantas na linha e de 3,8 m na entrelinha de plantas.

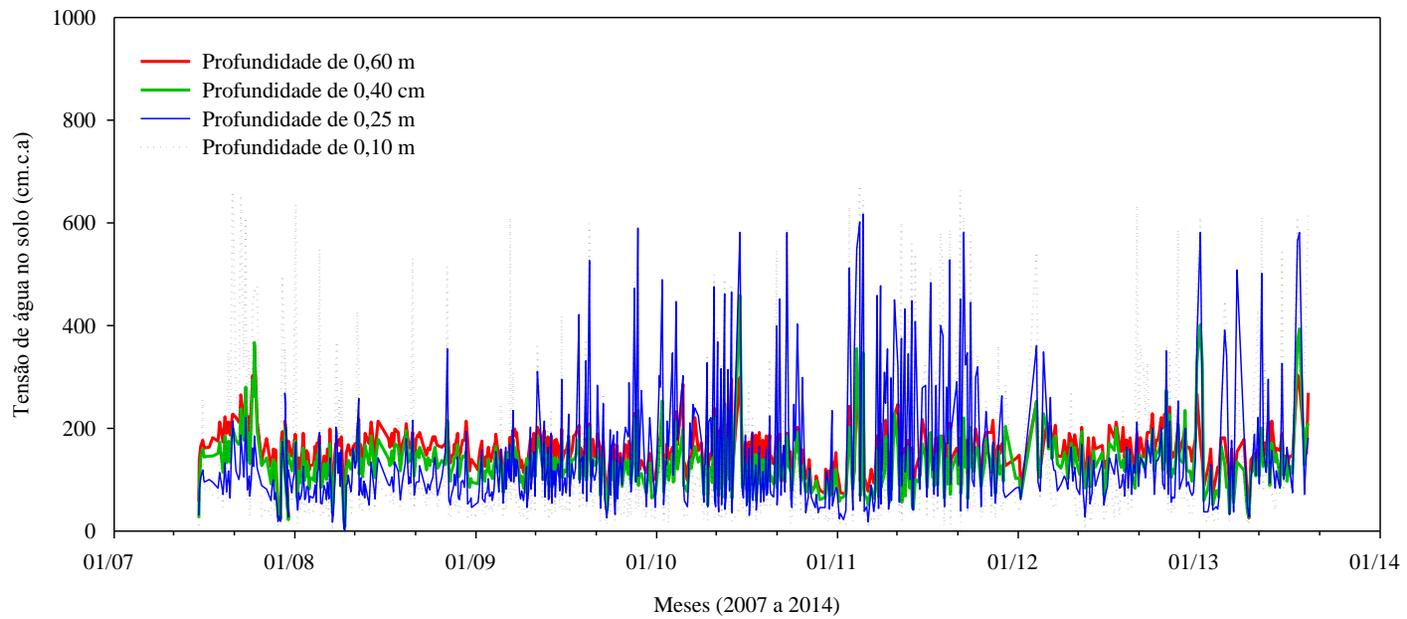


Gráfico 14 Tensão de água no solo nas profundidades de 0,10; 0,25; 0,40 e 0,60 m entre o mês de maio de 2007 e agosto de 2013. UFLA, Lavras -MG, 2015

Os tensiômetros localizados a 0,4 e 0,6 m apresentam pequenas oscilações, com poucas elevações, apresentando tensões em grande parte do período abaixo de 203,94 cm.c.a, equivalente a 20 kPa (Gráfico 14).

Esses resultados refletem o manejo de irrigação adotado, uma vez que o objetivo do manejo de irrigação foi manter o solo em condições necessárias para pleno desenvolvimento do cafeeiro. Para isso, adotou-se para o manejo de irrigação, a faixa de tensão entre 203,94 cm.c.a (20 kPa) e 611,83 cm.c.a (60 kPa), conforme os resultados obtidos por Assis et al. (2014) e Carvalho et al. (2006).

Carvalho et al. (2006) avaliaram o crescimento do cafeeiro, cultivar Rubi- MG-1192, submetido a diferentes regimes de irrigação (sem irrigação e com irrigações nas tensões de água no solo de 20 e 100 kPa), em duas densidades de plantio, 2 500 plantas/ha ($4,0 \times 1,0$ m) e 10 000 plantas/ha ($2,0 \times 0,5$ m). Esses autores verificaram que nas duas densidades de plantio, as plantas submetidas a tensões de 203,94 cm.c.a (20 kPa), tenderam a apresentar maior diâmetro de copa que na tensão de 1019,78 cm.c.a (100 kPa), entretanto, não apresentaram diferenças significativas para alturas de plantas.

Assis et al. (2014) avaliaram as características de crescimento e de produção do cafeeiro irrigado e não irrigado, e estudaram a correlação dessas entre si, e com densidades de plantio e regimes hídricos. Esses autores realizaram as irrigações quando a tensão da água no solo atingiu valores próximos a 203,94 cm.c.a (20 kPa) e 611,83 cm.c.a (60 kPa), e observaram que não houve diferença significativa entre os regimes hídricos baseados na tensão de água no solo, para as características altura e diâmetro de caule.

As equações de ajuste ao modelo Logístico para diâmetro de copa de planta (Dc) e altura de planta (H) utilizadas na estimativa do índice de área foliar (IAF) estão no Gráfico 15.

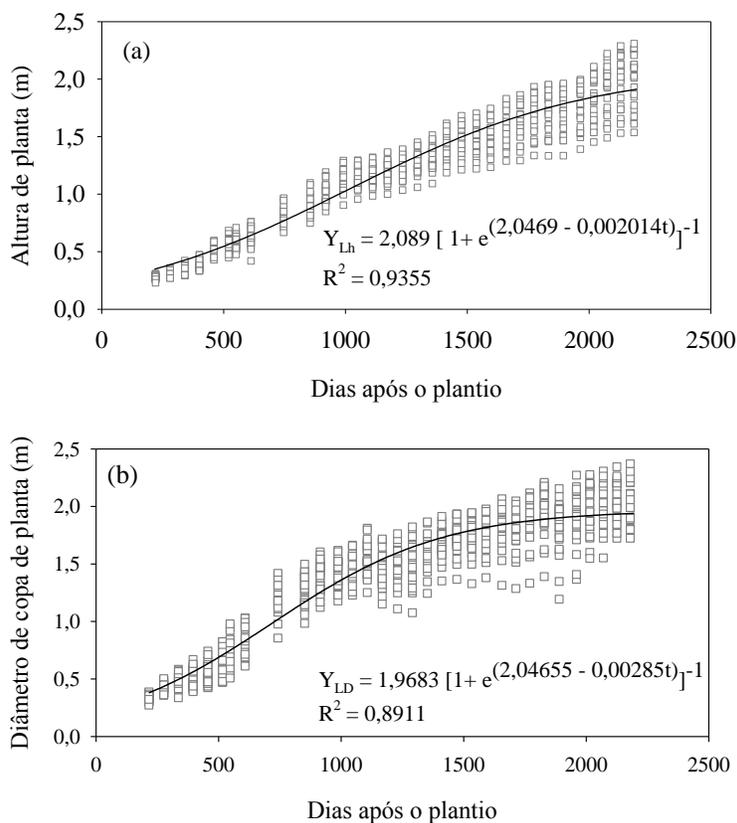


Gráfico 15 Equações de ajuste para altura de planta (a), em m, e diâmetro de copa (b), em m, de cafeeiros irrigados em função das épocas de avaliações, em DAP. UFLA, Lavras - MG, 2015

Nota-se que houve incremento significativo na altura do cafeeiro até aproximadamente 2000 DAP. Já o diâmetro de copa apresenta aumentos significativos até aproximadamente 1500 DAP, e a partir desse valor, há uma desaceleração nesse crescimento, com pequenos acréscimos no crescimento do cafeeiro com o aumento dos dias (Gráfico 15).

A planta de café é um arbusto de crescimento contínuo (THOMAZIELO et al., 2000), em seu ápice há uma zona de crescimento ativo durante toda a vida da planta, que vai alargando o ramo central (ortotrópico) formando-se nós e

entrenós (LEON, 1968). Os ramos laterais (plagiotrópicos) se formam ao longo do ramo ortotrópico, e crescem em comprimento e números de nós (REIS; CUNHA, 2010).

O Gráfico 16 apresenta as curvas das estimativas de GDD ajustadas em função dos dias após o plantio (DAP), para a cultivar Catiguá MG-3. Verifica-se que não houve diferenças entre as estimativas de GDD para os métodos de determinação de GDD residual (ARNOLD, 1959; DUFAULT, 1997; OMETTO, 1981; SNYDER, 1985) para as condições climáticas de Lavras-MG entre maio de 2007 e agosto de 2013.

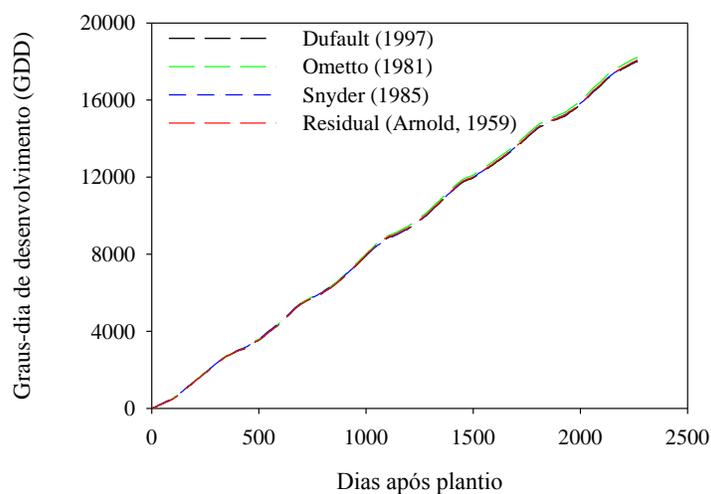


Gráfico 16 Curvas das estimativas de GDD ajustadas em função dos dias após o plantio DAP, para a cultivar Catiguá MG-3, usando o método de determinação de GDD residual (ARNOLD, 1959; DUFAULT, 1997; OMETTO, 1981; SNYDER, 1985) com temperatura base inferior (T_b) de $12,9^{\circ}\text{C}$ e temperatura base superior (T_B) de $32,4^{\circ}\text{C}$, nas condições climáticas de Lavras- MG, entre maio de 2007 e até agosto de 2013. UFLA, Lavras - MG, 2015

Moura (2009) ao determinar as temperaturas as bases inferior e superior de duas cultivares de cafeeiro arábica, associando os graus-dia acumulados com Kc, e com o crescimento vegetativo da cultura na fase inicial de produção, para as condições climáticas de Lavras-MG, constata que apesar dos métodos de determinação de GDD (residual) (ARNOLD, 1959; DUFAULT, 1997; OMETTO, 1981; SNYDER, 1985) terem apresentado somas diferentes para uma mesma temperatura base, não houve diferenças significativas entre os métodos, quando realizado o test ‘t’ de Student.

Os valores de Índice de área foliar (IAF) em função dos graus-dia de desenvolvimento para cafeeiro, no intervalo entre 1545 a 17576 GDD encontram-se no Gráfico 17.

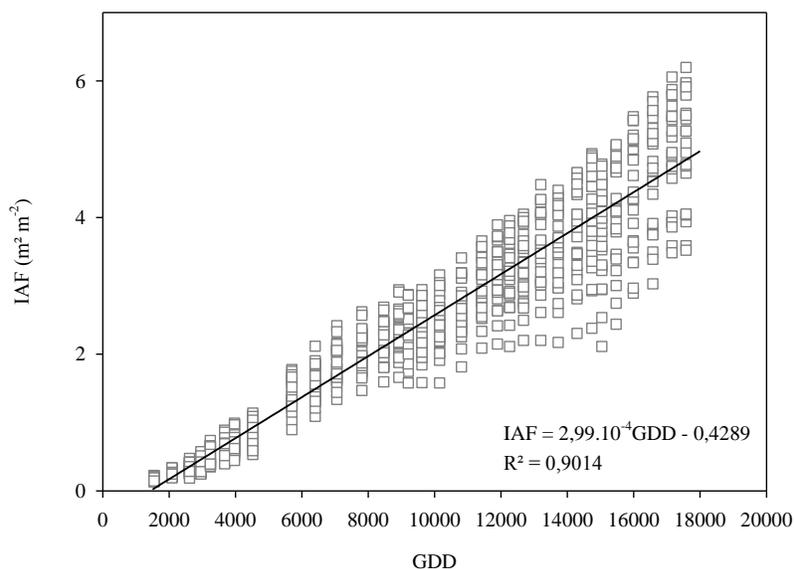


Gráfico 17 Equação de ajuste para Índice de área foliar (IAF) em função dos graus- dia de desenvolvimento para cafeeiro, cultivar Catiguá MG-3, no intervalo entre 1545 a 17576 GDD. UFLA, Lavras - MG, 2015

Houve um comportamento linear na evolução do IAF com coeficientes de determinação de 90,14%, indicando a adequação deste modelo em descrever o IAF de plantas de cafeeiros em função do grau- dia de desenvolvimento (Gráfico 17).

No início das avaliações (1545 GDD, equivalente aos 216 dias após o plantio) o cafeeiro apresentava cerca de 0,29 m de altura, 0,33 m de diâmetro de copa e foi observado índice de área foliar (IAF) de $0,18 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e ao final (17576 GDD, equivale aos 2180 dias após o plantio) 1,99 m de altura, 2,01 m de diâmetro de copa e IAF de $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Gráfico 17).

Nazareno et al. (2003), utilizaram equipamento eletrônico para determinação da área foliar, e verificaram que aos 216 dias após o plantio (DAP), as plantas irrigadas atingiram o IAF de $0,29 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e para o cafeeiro não irrigado, $0,22 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, já aos 383 DAT. Os valores obtidos por Nazareno et al. (2003) foram $1,16 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $0,66 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para o cafeeiro irrigado e não irrigado, respectivamente, sendo superiores àqueles obtidos aos 2958 GDD (396 DAP), em que o IAF foi de $0,37 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Entretanto, esses valores ficaram próximos ao obtidos por Pereira, Camargo e Villa Nova (2011) que observaram o IAF de $0,27 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 450 DAT.

Dominghetti (2013) determinou o IAF para cultivar Topázio MG 1190, aos 1020 DAP, e encontrou valores médios entre 2,36 e $3,11 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ que variaram de acordo com as lâminas de irrigação e doses de fósforo utilizadas no experimento, entretanto, essas variáveis não apresentaram diferenças significativas. Nota-se pelo Gráfico 17, que aos 1080 DAT (equivalente a 8923 GDD) o IAF foi de $2,31 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, sendo esse valor abaixo daquele mencionado por Dominghetti (2013).

No entanto, as diferenças observadas podem ser atribuídas principalmente à cultivar utilizada, às variações climáticas, à disponibilidade de água e nutriente no solo, além da densidade de plantio utilizada. Rezende et al.

(2014) ao avaliarem índice de área foliar, densidade de plantio e o manejo de irrigação do cafeeiro, concluíram que o índice de área foliar tende a aumentar com o acréscimo da densidade de plantio, e é variável ao longo do ano, sofrendo forte influência da colheita e da ocorrência de doenças e pragas.

Na Tabela 11, encontra-se a descrição matemática do Kc em função do índice de área foliar. Apesar dos quatro modelos utilizados apresentarem valores aproximadamente iguais de raiz quadradas, da média dos quadrados dos erros (0,09) e eficiência do modelo (E_f) próximo a unidade (1,00), sinalizando um bom desempenho dos modelos, o modelo Logístico foi aquele que apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,82$).

Tabela 11 Descrição matemática do Kc em função do Índice de área foliar. Valores ajustados dos parâmetros dos modelos linear, polinomial do segundo grau, Logístico e Gompertz, e os indicadores de qualidade de ajuste, RMSE, E_f e R^2

<u>Modelo linear (equação 22)</u>					
	a_{li}	b_{li}	RMSE	E_f	R^2
	0,1197	0,2198	0,0930	0,9999	0,7964
<u>Modelo polinômio do segundo grau (equação 23)</u>					
a_{po}	b_{po}	c_{po}	RMSE	E_f	R^2
-0,0122	0,1775	0,1810	0,0903	0,9999	0,8078
<u>Modelo Logístico (equação 24)</u>					
a_{Lo}	b_{Lo}	C_{Lo}	RMSE	E_f	R^2
0,7984	1,1426	0,7776	0,0875	0,9999	0,8195
<u>Modelo de Gompertz (equação 25)</u>					
a_{Go}	b_{Go}	C_{Go}	RMSE	E_f	R^2
0,8898	1,5461	0,4632	0,0891	0,9999	0,8129

Assim, foi utilizado o modelo Logístico para descrever os valores de Kc em função do índice de área foliar (Gráfico 18). Segundo este modelo, na região de Lavras, a cultivar Catiguá MG-3, em espaçamento adensado de 2,5 x 0,6 m (6.666 plantas por hectare), utilizando o sistema de irrigação localizado, quando

adequadamente irrigado, apresenta K_c que, dependendo do índice de área foliar, se aproxima assintoticamente de um valor máximo de 0,80, sendo que na última avaliação, o cafeeiro estava com seis anos e aproximadamente 1,97 m de altura.

Tais resultados aproximam-se dos valores citados por Allen et al. (1998), que propõem K_c para cafezais com manejo adequado e altura de 2 a 3 m entre 0,90 e 0,95, na ausência de plantas daninhas, adotando a evapotranspiração de referência estimada pela equação de Penman-Monteith (FAO). Esses resultados também corroboram com Arruda et al. (2000), que obtiveram valores de K_c que variaram entre 0,73 e 0,75 nos primeiros anos de plantio, e de 0,87 a 0,93 aos 7 e 8 anos, respectivamente.

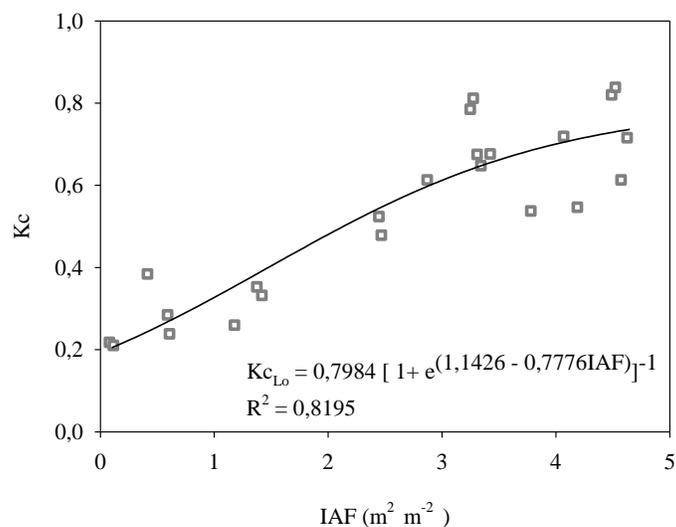


Gráfico 18 Coeficiente de cultivo (K_c) em função do índice de área foliar de cafeeiros arábicas. UFLA, Lavras - MG, 2015

Os resultados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994) e Pereira, Camargo e Villa Nova (2011), foram confrontados com os resultados observados nesse experimento (Gráfico 19).

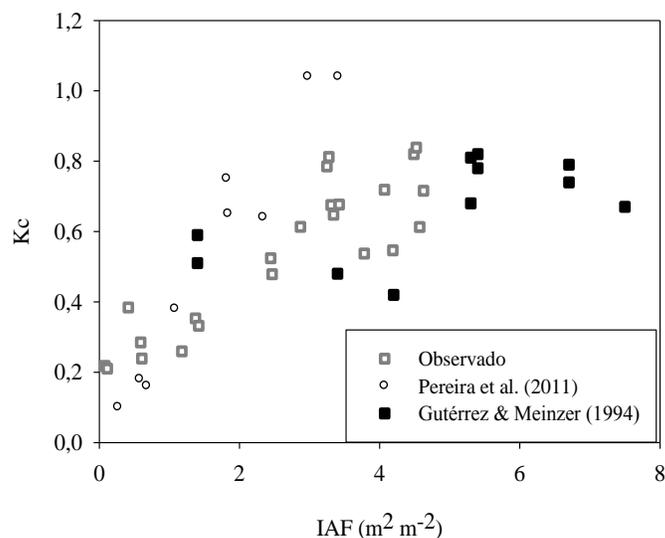


Gráfico 19 Coeficiente de cultivo em função do Índice de área foliar comparados aos resultados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994) e Pereira, Camargo e Villa Nova (2011). UFLA, Lavras - MG, 2015

Os valores de Kc observados ficaram acima dos valores obtidos por Pereira et al. (2011) para o IAF < 1,5 m² m⁻². No entanto para IAF > 1,5 m² m⁻², os valores de Kc foram inferiores aos obtidos por Pereira, Camargo e Villa Nova (2011) (Gráfico 19). De acordo com Pereira, Sedyama e Villa Nova (2013) um fator que pode deslocar a curva de kc, tanto para cima como para baixo, é a frequência de irrigação, que aumenta/diminui a evaporação direta pela superfície do solo pelo maior/menor molhamento da superfície.

Assim, essa diferença observada (Gráfico 19), provavelmente pode estar associada ao sistema de irrigação adotado. Pereira, Camargo e Villa Nova (2001) utilizou o sistema de irrigação por aspersão convencional, que aplica água em toda a superfície do solo, enquanto o sistema de irrigação por gotejamento, utilizado nesse experimento, tem como característica a aplicação

de água em uma área reduzida, próxima ao caule da planta, o que minimiza a área molhada na superfície do solo, e conseqüentemente, diminuiu o valor de K_c .

Já os valores de K_c para o $IAF < 1,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ficaram acima do valores obtidos por Pereira, Camargo e Villa Nova (2011), pois, no início do desenvolvimento da cultura, o solo está totalmente exposto a insolação e com alta frequência de irrigação, sem a cobertura da faixa molhada pela área foliar do cafeeiro, gerou um aumento na taxa da ET. Outra explicação seria a dependência desse parâmetro com as condições atmosféricas locais, como temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, que de certa forma contribui para as divergências entre os valores de K_c .

Em relação aos dados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994), em campos irrigados por gotejamento em lavoura comercial de cafeeiro no Havaí, os valores de K_c apresentam certa semelhança para IAF próximo a $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Gutiérrez e Meinzer (1994) apresentaram valores de K_c para IAF até $7,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, ou seja, uma maior amplitude para os dados de IAF . Nesse estudo, conduzido entre maio de 2007 a agosto de 2013, em Lavras-MG, o maior valor de IAF foi de aproximadamente $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, dessa forma, uma nova curva de regressão foi obtida, considerando os dois conjunto de dados (Gráfico 20). Para isso considerou a_{Lo} de aproximadamente 0,80, valor obtido para os dados estudados, conforme a Tabela 11, que representa o valor máximo do K_c tangível previsto pelo modelo Logístico.

Neste caso, é importante destacar, que o cafeeiro apresenta como característica, uma evolução na curva de K_c na fase de crescimento até alcançar o dossel máximo, mantendo a partir daí uma certa estabilidade nos seus valores de K_c , com algumas oscilações decorrente de processos fisiológicos e do manejo da cultura.

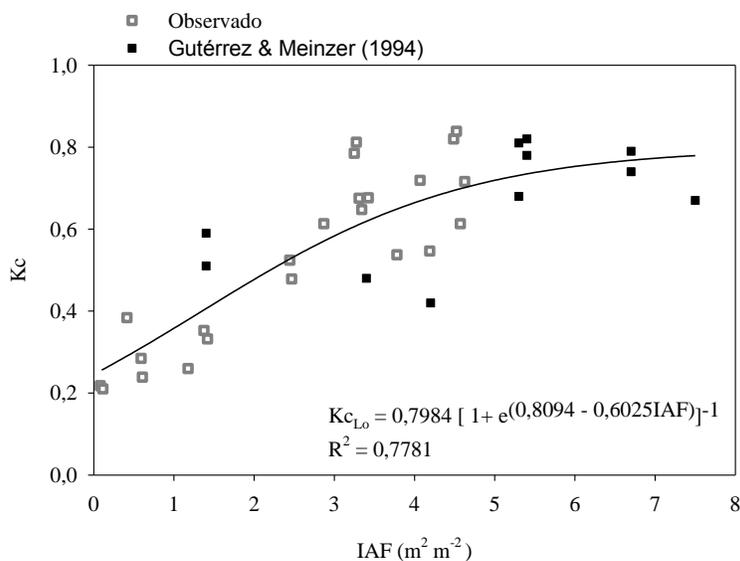


Gráfico 20 Coeficiente de cultivo (K_c) em função do Índice de área foliar de cafeeiros arábica, irrigados por gotejamento, considerando os dados observados nesse experimento e os resultados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994). UFLA, Lavras - MG, 2015

Os valores de K_c em função do IAF apresentaram um ajuste significativo, em que o modelo explica 77,81% dos resultados apresentados após a incorporação dos dados obtidos por Gutiérrez e Meinzer (1994). Além disso, observa-se que não há incremento significativo no K_c (0,74) a partir do valor de IAF de $5,50 m^2 m^{-2}$ (Gráfico 20).

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Flumignam, Faria e Prete (2011), que determinaram os valores de K_c de cafeeiro da cultivar IAPAR 59, com lisimetria de pesagem que apresenta alta precisão de medida, e recomendaram valores de 0,76 e 0,91 para sistema de irrigação por gotejamento, em função da ET_0 diária maior ou igual a $3,00 mm/dia$ ou menor que $3,00 mm/dia$, respectivamente. Ressaltando-se que os valores de ET_0 diário, utilizados no período de estudo, variaram de $1,45 mm d^{-1}$ a $4,26 mm d^{-1}$,

apresentando um valor médio de $2,90 \text{ mm d}^{-1}$, conforme descrito na Tabela 5. Já os dados de Gutiérrez e Meinzer (1994) variaram de $4,06 \text{ mm d}^{-1}$ à $7,42 \text{ mm d}^{-1}$, apresentando um valor médio de $5,90 \text{ mm d}^{-1}$.

4.6 Produtividade do cafeeiro

Na Tabela 12, encontram-se os valores da produtividade média em scs ha^{-1} do cafeeiro, ‘Catiguá MG-3’, na região de Lavras, plantada em espaçamento adensado de $2,5 \times 0,6 \text{ m}$, obtidas ao longo de quatro anos de produção, colhidas em 2010, 2011, 2012 e 2013, sob duas formas de parcelamentos (P4 e P12), com diferentes doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%).

A produtividade média em scs ha^{-1} do cafeeiro, ‘Catiguá MG-3’, obtida ao longo de quatro safras, colhidas em 2010, 2011, 2012 e 2013, apresentou efeito significativo apenas para as doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%) pelo teste F, ao nível de significância de 1% ($P < 0,01$) (Tabela 13).

Resultados similares foram obtidos por Coelho et al. (2009), que ao avaliarem o efeito de épocas de irrigação e de parcelamentos (4, 12, 24 e 36 aplicações de fertilizantes) e de adubação sobre a produtividade do cafeeiro ‘Catuai’, concluíram que o parcelamento de aplicação de fertilizantes não proporcionaram alterações que resultassem em diferenças de produtividade do cafeeiro.

Tabela 12 Produtividade de café beneficiado (2010, 2011, 2012 e 2013), cultivar 'Catiguá MG-3', avaliado em duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com diferentes doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%). UFLA, Lavras - MG, 2015

Parcel.	Tratamentos		Produtividade (Scs ha ⁻¹)					
	Dose	Bloco	2010	2011	2012	2013	Média	
Quatro vezes ao ano (P4) no período das chuvas (Nov., Dez., Jan., Fev.)	30%	1	33,34	14,34	33,30	4,87	21,46	21,14
		2	28,86	6,80	13,25	4,09	13,25	
		3	61,00	9,50	40,36	3,93	28,70	
	80%	1	47,86	18,10	55,88	3,47	31,33	34,89
		2	52,76	6,64	60,06	1,89	30,34	
		3	39,30	28,76	86,55	17,37	43,00	
	130%	1	51,56	34,16	78,52	28,05	48,07	43,66
		2	58,91	26,74	77,16	13,82	44,16	
		3	76,90	5,15	70,17	2,82	38,76	
	180%	1	47,30	39,10	71,59	12,78	42,69	46,86
		2	49,04	39,21	80,71	62,47	57,85	
		3	44,16	35,71	56,37	23,92	40,04	
	230%	1	79,79	37,01	101,71	35,88	63,60	47,54
		2	65,60	17,37	85,85	7,45	44,07	
		3	42,77	26,25	44,83	25,91	34,94	
Doze vezes ao ano (P12), aplicações mensais	30%	1	51,94	9,98	24,84	8,98	23,94	24,62
		2	61,84	14,95	26,93	10,60	28,58	
		3	47,87	3,52	29,74	4,22	21,34	
	80%	1	70,60	7,25	52,00	8,93	34,70	38,96
		2	68,88	7,16	60,28	4,74	35,27	
		3	88,30	11,06	80,78	7,49	46,91	
	130%	1	87,97	11,01	77,88	4,74	45,40	45,43
		2	58,85	13,16	48,65	11,62	33,07	
		3	72,50	22,08	117,99	18,68	57,81	

“Tabela 12, conclusão”

Parcel.	Tratamentos		Produtividade (Scs ha ⁻¹)				
	Dose	Bloco	2010	2011	2012	2013	Média
Doze vezes ao ano (P12), aplicações mensais	180%	1	69,38	22,93	74,27	15,28	45,46
		2	52,67	19,54	69,34	30,89	43,11
		3	92,40	5,86	76,42	13,35	47,01
	230%	1	82,42	16,58	69,21	8,70	44,23
		2	79,19	14,42	56,63	40,45	47,67
		3	60,96	33,26	98,00	34,61	56,71

Tabela 13 Análise de variância da produtividade média de quatro safras de café beneficiado (2010, 2011, 2012 e 2013), cultivar ‘Catiguá MG-3’, avaliado em duas formas de parcelamentos (P4 e P12) com diferentes doses de adubação (30%, 80%, 130%, 180% e 230%). UFLA, Lavras - MG, 2015

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	71,692667	35,846333	0,383	0,7231 ^{NS}
PARC	1	27,648000	27,648000	0,295	0,6413 ^{NS}
erro 1	2	187,226000	93,613000		
DOSES	4	2593,998000	648,499500	9,127	0,0005**
PARC X DOSES	4	29,922000	7,480500	0,105	0,9790 ^{NS}
erro 2	16	1136,868000	71,054250		
Total	29	4047,354667			

^{NS} O teste não foi significativo. ** Valores significativos pelo teste F, ao nível 1% de significância.

Para descrição matemática da dependência da produtividade média do cafeeiro, obtida ao longo de quatro safras em relação ao nível de adubação de N e K, foram utilizados os modelos polinômio do segundo grau e Mitscherlich. Os valores ajustados dos parâmetros dos modelos estudados foram descritos na Tabela 14.

Tabela 14 Valores ajustados dos parâmetros dos modelos Mitscherlich e polinomial do segundo grau, e os indicadores de qualidade de ajuste, RMSE, E e R². UFLA, Lavras - MG, 2015

Modelo polinômio do segundo grau (equação 26)					
a _p	b _p	c _p	RMSE	E _f	R ²
-8,3458x10 ⁻⁴	0,3384	14,1400	1,7819	0,9999	0,9644
Modelo Mitscherlich (equação 27)					
a _M	b _M	c _M	RMSE	E _f	R ²
49,4007	9,8285	0,0156	1,4852	0,9999	0,9750

Os modelos polinomial do segundo grau e Mitscherlich apresentaram eficiência (E_f) de 0,99, sinalizando o bom ajuste dos modelos. Entretanto, o modelo de Mitscherlich foi o que melhor descreveu a produtividade média do cafeeiro em relação ao nível de adubação de N e K, por apresentar o menor valor para RMSE (1,4852) e o maior R² = 0,97 (Tabela 14).

No Gráfico 21, encontra-se a produtividade média do cafeeiro ao longo dos quatros anos de produção e suas respectivas equações matemáticas (polinomial de segundo grau e Mitscherlich) que descrevem a relação da produtividade média do cafeeiro com os níveis de N e K. Verifica-se que os menores níveis de adubação de N e K₂O (30% e 80%) restringiram a produtividade do cafeeiro em lavouras irrigadas, apresentando valores de produtividade média bem inferior aos demais (130%, 180% e 230%), que não apresentam diferenças expressivas entre si (< 4,35 Scs ha⁻¹, conforme pode ser observado também, pelas diferenças dos valores médios dos quatros anos de produção na Tabela 12).

Este comportamento justifica o melhor desempenho do modelo de Mitscherlich em relação ao modelo do polinômio do segundo grau, uma vez que o acentuado decréscimo de produtividade nos maiores níveis de adubação, que é previsto pelo modelo do segundo grau, não foi observado nos dados de campo.

A ausência de decréscimo de produtividade nas maiores taxas de aplicação foram também relatadas nos estudos de Tumusiime et al. (2011).

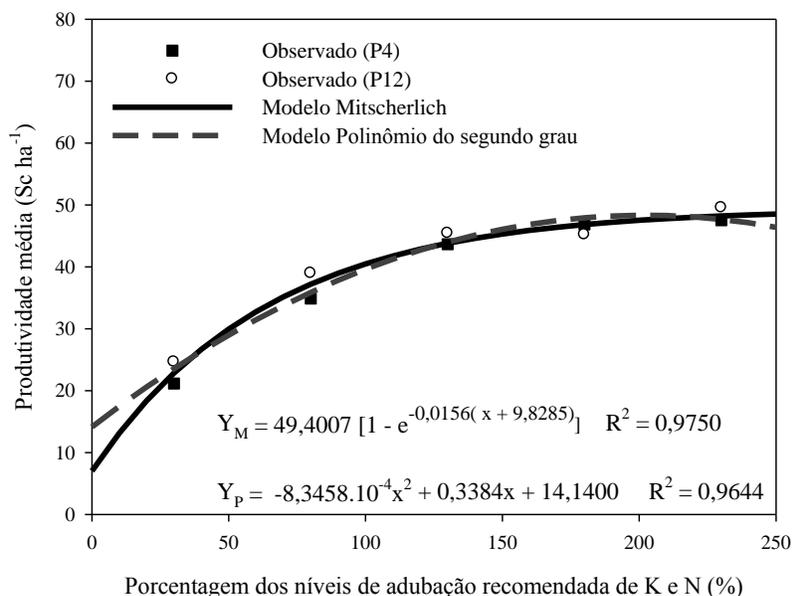


Gráfico 21 Curvas de resposta dos dados médios de quatro anos de produção (scs ha⁻¹) de café beneficiado submetida a diferentes níveis de adubação, ajustadas aos valores observados (pontos na cor preta cheia (P4) e branco (P12)) segundo os modelos: polinômio do segundo grau (linha tracejada) e Mitscherlich (linha cheia). UFLA, Lavras - MG, 2015

Para melhor visualização das diferenças entre as respostas de produtividade aos níveis crescentes de N e K, previstas pelos modelos de Mitscherlich e do polinômio de segundo grau, foram plotados no Gráfico 22, a derivada das curvas de resposta ajustadas.

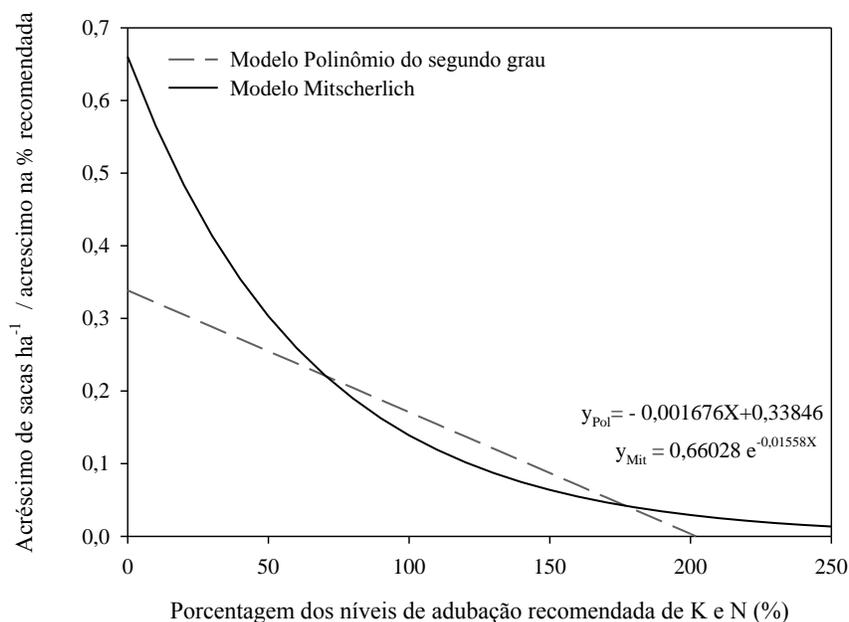


Gráfico 22 Derivada das curvas de resposta de produtividade versus porcentagem do nível de adubação recomendado de N e K. UFLA, Lavras - MG, 2015

De acordo com o modelo Mitcherlich, na região de Lavras, a cultivar Catiguá MG-3, em espaçamento adensado de 2,5 x 0,6 m, não apresenta acréscimo significativo de produtividade acima de 120% do nível de adubação recomendado (acréscimos menores que 0,1 sacas por hectare, visto no Gráfico 22) com uma produtividade que dependendo da quantidade de adubo disponibilizada, se aproxima assintoticamente de um valor máximo de 49,4 sacas beneficiadas/hectare (Gráfico 21).

Em relação ao modelo polinomial do segundo grau, verificou-se uma produtividade máxima de 48,3 sacas beneficiadas/hectare para a cultivar Catiguá MG-3, que foi atingida com o nível de 202% da recomendação para sequeiro (Gráfico 21). No entanto, por meio da análise da derivada (Gráfico 22), verifica-

se que porcentagens de adubação de N + K da ordem de 140% do recomendado, correspondem ao acréscimo menor que 0,1 sacas por hectare. Sendo que os níveis de adubação acima de 202% do recomendado para sequeiro, segundo o modelo polinomial do segundo grau, geram uma queda na produtividade, com decréscimo na produção com aumento dos níveis de adubação (Gráfico 22).

Níveis de adubações acima de 100% do recomendado para sequeiro, de acordo com a recomendação de Guimarães et al. (1999), para obtenção da produtividade máxima, também foram encontrados por Pinto et al. (2013), que avaliando a cultivar Topázio MG-1190, na região de Lavras, no espaçamento de 2,0 x 0,6 m, utilizando o modelo polinômio do segundo grau, concluíram que para lavouras fertirrigadas no primeiro ano de adubação após o plantio, o melhor nível de adubação com nitrogênio, fósforo e potássio foi de 118,33% da recomendação para sequeiro.

Com intuito de generalizar a resposta da produtividade aos diferentes níveis de adubação, os valores de produtividade previstos pelos dois modelos foram adimensionalizados em relação ao máximo valor de produtividade previsto em cada um dos modelos ajustado.

Na Tabela 15, são apresentados os parâmetros dos modelos de produtividade adimensional de Mitcherlich e do polinômio do segundo grau, e o Gráfico 23 ilustra as curvas de produtividade relativa prevista pelos dois modelos em função da percentagem do nível de adubação recomendado.

Tabela 15 Valores ajustados dos parâmetros dos modelos de produtividade adimensional de Mitcherlich e do polinômio do segundo grau. UFLA, Lavras - MG, 2015

Modelo polinômio do segundo grau (equação 32)			Modelo Mitscherlich (equação 33)	
a_p/Y_{mp}	b_p/Y_{mp}	c_p/Y_{mp}	b_M	c_M
$-1,7269 \cdot 10^{-5}$	0,00699	0,2926	9,8285	0,0156

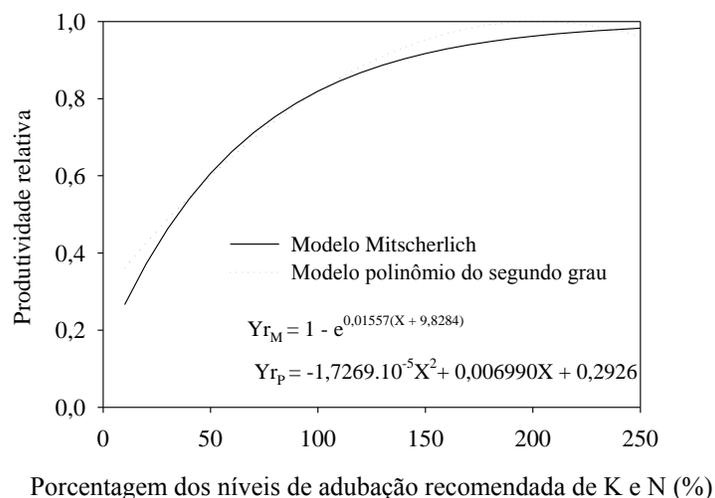
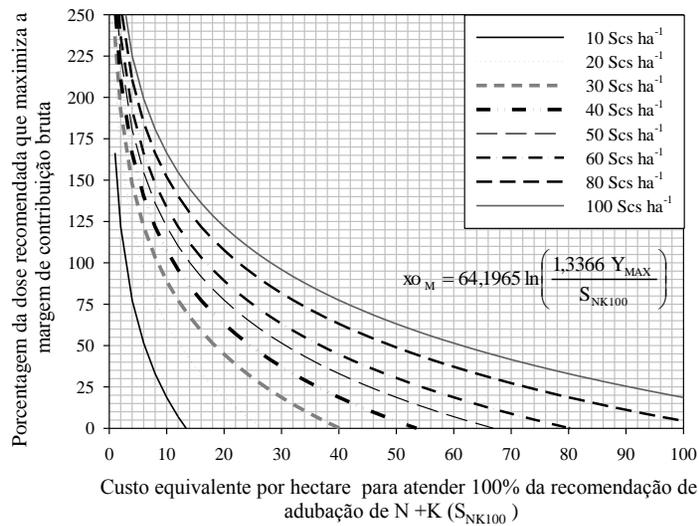


Gráfico 23 Produtividade relativa prevista pelos modelos Mitscherlich e polinomial do segundo grau. UFLA, Lavras - MG, 2015

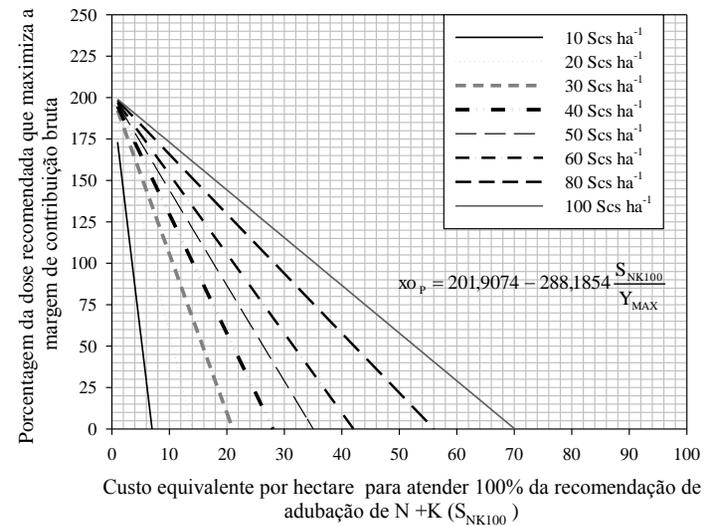
Com base nos valores adimensionais de produtividade foi possível determinar a porcentagem da dose de adubo, que maximiza a margem de contribuição bruta para diferentes combinações de níveis de produtividade máxima (desde 10 sacas até 100 sacas), e custo equivalente (SNK100 em sacas/ha CNK100/P_S) para atender, em um hectare, 100% do nível de recomendação de N+K conforme Guimarães et al. (1999) (Gráfico 24).

Nota-se que o SNK100 para atender, em um hectare, 100% do nível de recomendação de N+K conforme Guimarães et al. (1999), apresenta sempre valores menores quando utiliza a equação 39, originada do modelo Mitscherlich, para as dosagens maiores (acima de 75%) de adubo, que maximiza a margem de contribuição bruta para as diferentes combinações de níveis de produtividade máxima (desde 10 saca até 100 sacas), (Gráfico 24a), quando comparado aos valores previsto pela equação 38, originada do modelo polinomial do segundo grau (Gráfico 24b).

Esse resultado está associado a descrição matemática da curva de regressão de cada modelo, uma vez que o modelo polinomial do segundo grau prevê um decréscimo de produtividade nos maiores níveis de adubação.



(a)



(b)

Gráfico 24 Recomendação de adubação N+K em função do custo equivalente por hectare para atender 100% da recomendação de adubação de N+K expressa em número de sacas beneficiadas, de acordo com os modelos: Mitscherlich (a).e polinomial do segundo grau (b). UFLA, Lavras - MG, 2015

Os efeitos das inúmeras combinações possíveis de custo por hectare, da aplicação de 100% da recomendação da adubação de N+K (CNK100), preço de venda da saca de café beneficiado (PS), e produtividade máxima que seria atingida por uma lavoura livre de restrições de adubação, foram sintetizados em único fator (FNK100).

Assim, pode-se obter valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K para os dois modelos, admitindo-se a produção máxima que seria atingida por uma lavoura livre de restrições de adubação, de 48,85 sacas beneficiadas/hectare (obtida da média das produtividades máxima encontrada nesse experimento, 49,4 e 48,3 sacas beneficiadas/hectare, previsto pelo modelo de Mitcherlich e do polinômio do segundo grau) (Tabela 16).

O valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendado de N+K, segundo a equação 42 originada do modelo Mitcherlich, foi de 102,50%, 147,55%, 72,50% e 95,24% para os anos de produção de 2010, 2011, 2012 e 2013, respectivamente (Tabela 16).

Por outro lado, quando se utiliza a equação 41, originada do modelo polinomial do segundo grau, o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendado de N+K é de 124,01%, 163,54%, 77,31% e 114,62% para os anos de produção de 2010, 2011, 2012 e 2013, respectivamente (Tabela 16).

Tabela 16 Valores dos custos médios dos fertilizantes (C_{NK100}), da saca de café beneficiado (Ps), do Custo equivalente por hectare (incluindo aquisição e aplicação) para atender 100% da recomendação de adubação de N +K (S_{NK100}), da fração da receita bruta comprometida com o custo da aplicação de 100% da recomendação de adubação de N+K (F_{NK100}) e o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada N+K para os modelos Mitcherlich (XO_M) e polinomial do segundo grau (XO_P) entre os anos de 2010 e 2013. UFLA, Lavras - MG, 2015

Ano	Y_{MAX} sc ha ⁻¹	¹ Ps R\$ Saca ⁻¹	KNO3	Ureia	KNO3	Ureia	C_{NK100} R\$ ha ⁻¹	S_{NK100} sc ha ⁻¹	F_{NK100} -	XO_M %	XO_P %
			¹ Preço médio -----R\$/kg-----		Fertilizante -----kg ha ⁻¹ -----						
2010	48,85	298,17	7,50	1,65	431	431	3943,65	13,23	0,271	102,50	124,01
2011	48,85	477,35	8,00	2,10	171	839	3129,90	6,56	0,134	147,55	163,54
2012	48,85	382,96	8,00	2,45	772	778	8082,10	21,10	0,432	72,50	77,31
2013	48,85	275,98	8,50	2,31	227	934	3973,54	14,40	0,295	95,24	114,62
Média	48,85	358,62	8,00	2,13	400,25	745,50	4782,30	13,82	0,28	104,45	119,87

¹Fonte: Instituto de Economia Agrícola - IEA (2014).

Verifica-se que para os quatros anos de produção, o valor ótimo econômico da dose recomendada foi maior quando utilizado o modelo polinomial de segundo grau. A obtenção de menores valores de dose econômica ótima com o modelo de Micherlich, em relação ao modelo polinomial de segundo grau, também foi relatada por outros autores (BACHMAIER; GANDORFER, 2012; CERRATO; BLACKMER, 1990).

Menores valores de dose econômica são mais adequados, uma vez que a nossa análise econômica não leva em conta o custo social de uma aplicação excessiva de fertilizante. Pois, de acordo com Tumusiime et al. (2011), aplicação excessiva de fertilizantes tem um custo social decorrente da contaminação do lençol freático.

Para o caso específico de aplicação excessiva de fertilizante, Wang et al. (2014) incluem também nos custos sociais, a emissão de gases ligados ao efeito estufa, eutrofização das águas e acidificação do solo. Wang et al. (2014) obtiveram doses econômicas ótimas que resultaram em redução nos impactos ambientais.

Analisando os valores obtidos das médias dos quatros anos de produção, verifica-se que o valor ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K é de 104%, de acordo com o modelo de Mitcherlich, e de 119,87% segundo o modelo polinomial do segundo grau. Por meio dessas análises observa-se que, caso fosse considerado o ponto máximo na curva como o melhor nível de porcentagem de adubação, através do modelo polinomial do segundo grau, o valor do nível de adubação seria bem maior, 202% (Gráfico 21). Com base na derivada (Gráfico 22), levando em consideração os acréscimos menores que 0,1 sacas por hectare, os valores para os níveis de adubação recomendado seria, 120% e 140%, segundo o modelo de Mitcherlich e polinomial do segundo grau, respectivamente.

Essa diferença aconteceu, pois, na obtenção do nível ótimo econômico da porcentagem da dose recomendada de N+K, levou-se em consideração a produtividade e as relações de preços dos fertilizantes e da venda de sacas de café do período, sendo esta, muito importante, pois é a que proporciona a melhor relação custo-benefício.

5 CONCLUSÕES

A concentração de NO_3^- e K^+ no extrato saturado foi altamente variável no tempo, sendo que a forma de adubação com 12 parcelamentos apresentou maior estabilidade temporal durante o período avaliado.

A forma de adubação com 4 parcelamentos durante o período das chuvas, causam maior lixiviação de NO_3^- e K^+ .

Os modelos, Logístico e Gompertz, apresentaram bons ajustes, sendo indicados conforme os avaliadores de qualidade, para descrever o índice de área foliar do cafeeiro ao longo do tempo.

O índice de área foliar e a produtividade média das safras de 2010, 2011, 2012 e 2013, não foram influenciados pelas formas de parcelamentos (quatro e doze aplicações/ano).

Níveis abaixo de 80% da adubação com N e K recomendada para plantas não irrigadas, restringiu o crescimento e a produtividade do cafeeiro em lavouras irrigadas.

O aumento dos níveis acima do patamar de 130%, não promovem diferenças expressivas no índice de área foliar ($< 0,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) das plantas de cafeeiros fertirrigadas em quatro e doze parcelamentos.

O cafeeiro arábica, cultivar Catiguá MG-3, na região de Lavras, MG, plantado no espaçamento adensado de 2,5x 0,6m (6 666 plantas por hectare), irrigado por gotejamento, apresentou valores de Kc mínimo de 0,21, Kc médio de 0,57 e Kc máximo de 0,80 aproximadamente, sendo que na última avaliação, o cafeeiro estava com seis anos de plantio e aproximadamente 2 m de altura.

O modelo de Mitscherlich foi o que melhor descreveu a produtividade média do cafeeiro em relação ao nível de adubação de N e K. Segundo este modelo, para o cafeeiro, a produtividade média para quatro anos de produção, incluindo os anos de baixa e alta produção, dependendo da quantidade de N + K

aplicada, se aproximou assintoticamente de um valor máximo de 49,4 sacas beneficiadas/hectare.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Dranaige Paper, 56).
- ALLEN, R. G. et al. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 1-35, 1994.
- ALVES, J. D.; LIVRAMENTO, D. E. **Morfologia e fisiologia do cafeeiro**. Lavras: UFLA, 2003. 46 p.
- ALVES, M. S. et al. Concentração do íon NO₃⁻ no solo sob diferentes combinações de fontes nitrogenadas via fertirrigação em bananeira no segundo ciclo de produção. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 18., 2008, São Mateus. **Anais...** São Mateus: ABID, 2008. 1 CD-ROM.
- ANDRADE, M. G. F. de et al. Controle de custos na agricultura: um estudo sobre a rentabilidade na cultura da soja. **Custos e @gronegocio On Line**, Recife, v. 8, n. 3, jul./set. 2012. Disponível em: <http://www.abcustos.org.br/texto/viewpublic?ID_TEXTO=3425>. Acesso em: 10 nov. 2014.
- ANDRADE NETO, T. M. et al. Concentração de nitrato na solução do solo em função da aplicação de nitrato de cálcio e uréia. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 18., 2008, São Mateus. **Anais...** São Mateus: ABID, 2008. 1 CD-ROM.
- ANTUNES, R. C. B. et al. Influência da fertirrigação em nitrogênio e potássio nos componentes vegetativos do cafeeiro arábica em formação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2000. 1 CD-ROM.
- ARANTES, K. R. et al. Desenvolvimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) podado sob irrigação. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 4, n. 1, p. 75-86, 2006.
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, p. 430-445, 1959.

ARRUDA, F. B. et al. Resultados anuais do coeficiente de cultura do cafeeiro em um ensaio em Pindorama, SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café; MINASPLAN, 2000. v. 2, p. 790.

ASSIS, G. A. et al. Correlação entre crescimento e produtividade do cafeeiro em função do regime hídrico e densidade de plantio. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 666-676, maio/jun. 2014.

ÁVILA, L. F. et al. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 247-256, abr. 2014.

BACHMAIER, M. E.; GANDORFER, M. Estimating uncertainty of economically optimum N fertilizer rates. **International Journal of Agronomy**, Cairo, v. 2012, p. 1-10, 2012.

BARRETO, C. V. G. et al. Distribuição espacial do sistema radicular do cafeeiro fertirrigado por gotejamento em Campinas. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 641-647, 2006.

BARROS, R. S.; MAESTRI, M.; RENA, A. B. Coffee crop ecology. **Tropical Ecology**, Varanas, v. 36, n. 1, p. 1-19, 1995.

BORGES, A. L.; COELHO, E. F. **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. 2. ed. Cruz das Almas: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. 180 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais climatológicas**: 1961-1990. Brasília: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.

BURT, C. M. Fertigation: the next frontier. **Irrigation Business and Technology**, San Luis Obispo, v. 3, n. 4, p. 16-19, 1995.

CARELLI, M. L. C.; FAHL, J. I.; MAGALHÃES, A. C. Assimilação de nitrato durante o desenvolvimento reprodutivo de plantas de café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 13, p. 59-64, 1989.

CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculturae**, Cambridge, v. 37, n. 1, p. 1-36, 2001.

CARVALHO, C. H. M. et al. Evolução do crescimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado e não irrigado em duas intensidades de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 243-250, mar./abr. 2006.

CERRATO, M. E.; BLACKMER, A. M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 138-143, 1990.

COELHO, G. et al. Efeito de épocas de irrigação e de parcelamento de adubação sobre a produtividade do cafeeiro 'Catuai'. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 67-73, jan./fev. 2009.

COELHO, G. et al. Épocas de irrigação e parcelamento da adubação sobre a produtividade do cafeeiro arábica com 17 anos de idade. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 12-18, 2004.

COELHO, G.; SILVA, A. M. da. O efeito da época de irrigação e de parcelamentos de adubação sobre a produtividade do cafeeiro em três safras consecutivas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 400-408, mar./abr. 2005.

COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. dos S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 536-545, set./dez. 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café, safra 2013: segunda estimativa, maio 2013**. Brasília, 2013. 6 p.

COSTA, E. L. **Fertirrigação nitrogenada por gotejamento em cafezal e sua influência em características químicas do solo**. 2005. 85 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.

DOMINGHETTI, A. W. **Disponibilização de fósforo em lavouras cafeeiras sob diferentes manejos de irrigação**. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua em rendimento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Riego y Drenage, 33).

DOOREMBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DUFAULT, R. J. Determining heat unit requirements for broccoli in coastal South Carolina. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 122, n. 2, p. 169-174, Mar. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

ERNANI, P. R. et al. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 393-402, mar./abr. 2007.

FAGUNDES, A. V. **Adubação líquida na implantação da lavoura cafeeira (*Coffea arabica* L.)**. 2006. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

FARIA, F. H. de S. et al. Efeito de parcelamento da fertirrigação com n e k e salinidade do solo no crescimento inicial de cultivares de cafeeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 145-157, abr./jun. 2009.

FENILLI, T. A. et al. Nitrogênio no sistema solo x solo x ambiente. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5., 2007, Águas de Lindóia. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2007. p. 1-4.

FERNANDES, A. L. T. et al. Comparação da utilização de nitrato de amônio e uréia polimerizada na produtividade e maturação do cafeeiro irrigado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6., 2009, Vitória. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2009. 1 CD-ROM.

FERNANDES, A. L. T. et al. Estudo de estratégias para a minimização das perdas de nitrogênio na cafeicultura irrigada. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 8., 2013, Salvador. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2013. 1 CD-ROM.

FERNANDES, A. L. T. et al. Irrigação e utilização de granulados de solo na Produção de cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 9., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café; MINASPLAN, 2000. v. 2, p. 957-959.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FIGUEIREDO, W. S. C. **Evapotranspiração e efeito do déficit hídrico na floração do cafeeiro arábica**. 2010. 108 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

FLUMINGNAN, D. L.; FARIA, R. T.; PRETE, C. E. C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 5, p. 791-800, Mar. 2011.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 289-302.

GUTIÉRREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 119, n. 3, p. 652-657, 1994.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preços médios mensais pagos pelos agricultores**. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/precos_medios.aspx?cod_sis=2>. Acesso em: 22 abr. 2014.

KLEPKLER, D.; ANFHIONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos de solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 79-86, 1996.

KONRAD, M. **Efeito de sistemas de irrigação localizada sobre a produção e qualidade da acerola (*Malpighia spp*) na região da Nova Alta Paulista.**

2002. 119 p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

LAVIOLA, B. G. et al. Acúmulo em frutos e variação da concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 1, p. 19-31, 2008.

LEON, J. **Fundamentos botânicos de los cultivos tropicales.** San José: Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas, 1968. 230 p. (Serie de Texto y Materiales de Enseñanza, 18).

LIMA, E. P.; SILVA, E. L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 3, p. 266-273, 2008.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade.** Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1986. p. 165-274.

MANCUSO, M. A. C. **Fontes e doses de potássio na cultura do café.** 2012. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. R. **Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletânea de trabalhos.** Viçosa, MG: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais; UFV, 2003. 260 p. (Boletim Técnico, 8).

MARTINS, C. P. et al. Coeficiente de cultura (Kc) do cafeeiro irrigado no sul de Minas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6., 2009, Vitória. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2009. 1 CD-ROM.

MATZENOUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Evapotranspiração da cultura do milho II: relação com evaporação do tanque classe A, com evaporação de referência e com a radiação solar global em três época de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 15-20, jan./jun. 1998.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 26, n. 4, p. 513-519, 2004.

MELO, B. de et al. Desenvolvimento e produtividade de cultivares de cafeeiro submetido à irrigação em diferentes espaçamentos na linha de plantio: safra 2004. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 7., 2005, Araguari. **Anais...** Araguari: UFU, 2005. p. 54-56.

MOURA, D. C. M. de. **Determinação da temperatura base e coeficiente de cultura de duas cultivares de cafeeiro arábica em fase inicial de produção.** 2009. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

NASCIMENTO, L. M.; SPEHAR, C. R.; SANDRI, D. Produtividade de cafeeiro orgânico no cerrado após a poda sob diferentes regimes hídricos. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 354-365, jul./set. 2014.

NAZARENO, R. B. et al. Crescimento inicial do cafeeiro Rubi em resposta a doses de nitrogênio, fósforo e potássio e a regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 903-910, ago. 2003.

NEETESON, J. J.; WADMAN, W. P. Assessment of economically optimum application rates of fertilizer N on the basis of response curves. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 12, p. 37-52, 1987.

OLIVEIRA, P. M. de; SILVA, A. M. da; CASTRO NETO, P. Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 3, p. 273-282, set./dez. 2003.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

ORTOLANI, A. A. Graus-dia e zoneamento na cafeicultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFC, 2001. 1 CD-ROM.

PAGLIA, E. C. et al. Doses de potássio na lixiviação do solo com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 94-100, 2007.

PAIVA, R. N. et al. Irrigação suplementar em cafeeiros do sul de Minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 37., 2011, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: CBP&D Café, 2011. 1 CD ROM.

PEREIRA, A. A. et al. Evolução do crescimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado e não irrigado em duas intensidades de plantio. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 266-274, abr./jun. 2014.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, M. B. P.; VILLA NOVA, N. A. Coffee crop coefficient for precision irrigation based on leaf area index. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 946-951, 2011.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 2013. 323 p.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro Arábica. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 3, p. 499-505, 2003.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Exigência térmica do café arábica Mundo Novo no subperíodo florescimento-colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1781-1786, nov./dez. 2008.

PINTO, C. G. et al. Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes primários para cafeeiros fertirrigados no primeiro ano pós-plantio. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 530-538 out./dez. 2013.

PIRES, L. M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 845-852, set./out. 2007.

PUKHOSKII, A. V.; KHOKHLOV, N. F. Method of approximation and calibration of the Mitscherlich-Spillman-Baule-von Boguslawski model. **Russian Agricultural Sciences**, Moscow, v. 37, n. 1, p. 46-50, Feb. 2011.

REIS, P. R.; CUNHA, R. L. **Café arábica do plantio a colheita**. Lavras: EPAMIG, 2010. v. 1, 896 p.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro**: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p.

REZENDE, F. C. et al. Características produtivas do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv., Topázio MG-1190), recepado e irrigado por gotejamento. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 103-110, jul./dez. 2006.

REZENDE, F. C. et al. Índice de área foliar, densidade de plantio e manejo de irrigação do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 374-384, jul./set. 2014.

REZENDE, R. et al. Crescimento inicial de duas cultivares de cafeeiro em diferentes regimes hídricos e dosagens de fertirrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 447-458, jun. 2010.

RICCI, M. S. F.; FERNANDES, M. C. de A.; CASTRO, C. M. **Cultivo orgânico do café: recomendações técnicas**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2002. 101 p.

RONCHI, C. P. et al. Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, p. 187-195, mar. 2015.

SANT'ANA, J. A. V. et al. Café: como irrigar. **Cultivar Grandes Culturas**, Pelotas, ano 15, n. 169, p. 8-9, jun. 2013.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T. **Cultivo do cafeeiro irrigado em plantio circular sob pivô central**. Belo Horizonte: O lutador, 2002. 251 p.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T. **Cultivo do cafeeiro irrigado por gotejamento**. 2. ed. Uberaba: PLD, 2012. 388 p.

SATO, F. A. et al. Coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 383-391, maio/ago. 2007.

SILVA, A. C. et al. Produtividade e potencial hídrico foliar do cafeeiro Catuaí, em função da época de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 21-25, 2008.

SILVA, A. L. da; FARIA, M. A. de; REIS, R. P. Viabilidade técnicoeconômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 37-44, 2003.

SILVA, E. F. F. et al. Utilização de testes rápidos e extratores de solução do solo na determinação de nitrato e potássio. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 460-467, 2003.

SILVA, J. C. da; SILVA, A. A. S. **Sustentabilidade produtiva do cerrado**. Uberlândia: Composer, 2012. 242 p.

SILVA, M. de L. O. et al. Comportamento da produtividade acumulada de seis anos do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sob diferentes lâminas de irrigação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. **Anais...** Londrina: SBC, 2005. 1 CD-ROM.

SILVA, W. J.; VOLPE, C. A. Crescimento do fruto do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Acaiá, CP 474/19 e suas relações com variáveis meteorológicas em dois sistemas de plantio, no cerrado de Uberaba-MG. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 13, n. 2, p. 292-302, 2005.

SNYDER, R. L. Hand calculating degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 35, n. 1/4, p. 353-358, 1985.

SOARES, A. R. et al. Estudo comparativo de fontes de nitrogênio e potássio empregados na fertirrigação do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBC, 2000. 1 CD-ROM.

SOBREIRA, F. M. et al. Adubação nitrogenada e potássica de cafeeiro fertirrigado na fase de formação, em plantio adensado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 9-16, jan. 2011.

THOMAZIELLO, R. A. et al. **Café arabica**: cultura e técnicas de produção. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 82 p. (Boletim Técnico, 187).

TUMUSIIME, E. et al. How much does considering the cost of lime affect the recommended level of nitrogen? **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 404-412, Mar. 2011.

VILLAS BOAS, R. L. V.; ZANINI, J. R.; FEITOSA FILHO, J. C. Uso e manejo de fertilizantes em fertirrigação. In: _____. **Uso e manejo da fertirrigação e hidroponia**. Jaboticabal: FUNESP, 2002. p. 1-25.

WANG, G. L. et al. Determining the optimal nitrogen rate for summer maize in China by integrating agronomic, economic, and environmental aspects.

Biogeosciences, Orono, v. 11, n. 2, p. 2639-2664, June 2014.

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources, Life Science and Education**, Madison, v. 27, n. 1, p. 13-19, 1998.

WUTKE, E. B. et al. Estimativa de temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-61, 2000.

WYZYKOWSKI, J. **Modelos de regressão para descrição do cafeeiro irrigado e não irrigado após a recepa**. 2009. 76 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.