



Modelo matemático para previsão da produtividade do cafeeiro

José M. Miranda¹, Rosicler A. O. Reinato² & Adriano B. da Silva³

¹ Unifenas. Alfenas, MG. Fone: (35) 9974-2441. E-mail: jose.miranda@unifenas.br (Autor correspondente)

² Ifsulde Minas. Machado, MG. Fone: (35) 8817-2020. E-mail: rosicler.reinato@ifsulde Minas.edu.br

³ Unifenas. Alfenas, MG. Fone: (35) 8415-1848. E-mail: adriano.silva@unifenas.br

Palavras-chave:

índice fenológico
Coffea arabica
previsão de safra

RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, a criação de um modelo matemático, prático e eficiente para a previsão antecipada de safras com base em alguns atributos fenológicos da planta: altura, número de frutos no 4º e 5º internódios dos ramos plagiotrópicos, comprimento em metros das linhas de café e diâmetro medido na região inferior das plantas. O experimento foi montado nos cafezais do IFSULDEMINAS – Campus Machado, em que quatro cultivares de diferentes portes tiveram sua produtividade analisada durante a safra 2010/2011: Catucaí, Mundo Novo, Rubi e Topázio, cada uma se constituiu em unidade experimental na qual, por sua vez, foram amostradas 10 plantas aleatoriamente sendo 6 ramos amostrados em cada planta (três do lado do sol nascente e três do lado do sol poente, sendo dois no terço superior, outros dois na região intermediária e os dois últimos na região inferior de cada planta). Os dados foram colhidos no final do mês de fevereiro de 2011. O modelo que considera a proporção do volume de copa do cafeeiro tentando aproximar-se mais da arquitetura real da planta foi o mais significativo apresentando coeficiente de determinação de 0,83.

Key words:

phenological index
Coffea arabica
crop prediction

Mathematical model for predicting coffee yield

ABSTRACT

The objective of this work was to create a practical and effective mathematical model for the early prediction of crops based on some phenological attributes of the plant: height, number of fruits in the 4th and 5th internodes of the plagiotropic branches, length in meters of the planted coffee row and diameter measured at the lower region of the coffee plants. The experiment was carried out in the coffee plantations of IFSULDEMINAS – campus Machado – where the productivity of four cultivars of different sizes were analysed during the 2010-2011 season: Catucaí, Mundo Novo, Ruby and Topaz. Each of these was an experimental unit, from which 10 plants were randomly chosen. Of these, 6 branches of each plant were sampled (three on the side of the rising sun, and three on the side of the sunset; two in the upper third, and two in the middle region, and two in the lower region of each plant). Data were collected at the end of February 2011. The model which considers the proportion of the coffee plant canopy in order to get closer to the real architecture of the plant was the most significant, with a coefficient of determination of 0.83.

INTRODUÇÃO

A estimativa antecipada de safra nas regiões produtoras de café movimentam o mercado interno e externo. O café é um produto que apresenta demanda inelástica e a questão da informação confiável passa a ter grande relevância. Nas Bolsas de Valores a commodity café movimentam alto volume financeiro todos os dias podendo ser afetada por diferentes fatores, o que provoca sérias instabilidades no setor. Fenômenos como geadas, estresse hídrico, pragas e doenças, nutrição e aspectos econômicos, afetam sensivelmente a produtividade da cultura do café de ano para ano ocasionando bruscas oscilações de seus preços, o que compromete a regularidade do abastecimento interno e das exportações (Assad et al., 2007).

Outro fator que afeta a previsão de safra é a bialidade observada na cultura do café, que apresenta um ano de alta produtividade e outro de baixa. A bialidade é atribuída,

comumente, à diminuição das reservas das plantas em ano de alta produtividade fazendo com que ocorra menor crescimento dos ramos plagiotrópicos (ramos produtivos do cafeeiro) e, conseqüentemente, a produção mais baixa no ano seguinte (Da Matta et al., 2007; Silva et al., 2010). O emprego de boas práticas agrônômicas pode reduzir o efeito da bialidade e predispor as plantas de café a uma produção mais estável, ao longo do tempo.

O plantio de cafeeiros no sistema adensado poderia ser responsável por uma estabilidade maior na produção, ou seja, pela diminuição do ciclo bial por induzir menor produção por planta que proporciona um desgaste menor do cafeeiro (Camargo & Camargo, 2001; Pezzopani et al., 2009; Pereira et al., 2011). Menores produções por planta em menores espaçamentos podem condicionar a redução na bialidade de produção de cada planta em decorrência de menor esgotamento das plantas (DaMatta et al., 2007).

No caso específico da cafeicultura alguns trabalhos ilustram o potencial da aplicação do sensoriamento remoto no planejamento e desenvolvimento do setor (Assad et al., 2007; Ramirez & Zulo Júnior, 2010; Zacharias et al., 2008). Apesar da importância desses trabalhos, ainda são necessárias pesquisas que permitam que o sensoriamento remoto seja utilizado de maneira efetiva no levantamento, mapeamento e monitoramento de áreas cafeeiras. Neste contexto, o conhecimento da correlação entre fatores biofísicos da cultura e sua resposta espectral podem não só contribuir de maneira efetiva no uso das imagens de alta resolução espacial para o cadastro da cultura mas também auxiliar os métodos atuais de previsão e monitoramento de safras.

Os modelos propostos por Fahl et al. (2005) e Oliveira (2007) obtiveram bons resultados analisando atributos fenológicos das plantas, determinantes do crescimento e produção, em diferentes épocas de avaliação buscando determinar um modelo matemático para previsão de safras. Alguns trabalhos de previsão de safra associaram a produtividade do cafeeiro a atributos fenológicos das plantas e às condições agrometeorológicas (Carvalho et al., 2003; 2004; Fahl et al., 2005; Santos & Camargo, 2006; Oliveira, 2007; Alfonsi, 2008; Rosa et al., 2010).

Barbosa et al. (2012) utilizaram cafeeiros em fase produtiva de cultivos da região de Lavras, MG, das variedades Mundo Novo e Catuaí, coletados durante a estação seca e a estação chuvosa de 2010 a 2011. Nessas plantas foram avaliados a altura, a partir do nível do solo, o comprimento total de ramos plagiotrópicos, o comprimento da região sem folhas na copa e o IAF. Esses dados foram utilizados para estimar o volume de folhas das plantas e, posteriormente, para a obtenção de equações que descrevem o comportamento do IAF em função do volume de folhas. Verificaram-se três ajustes das variações de IAF em função do volume de folhas: comportamento linear, expolinear e sazonal. Os três modelos apresentaram estimativas realistas quando aplicados em cafeeiros do município de Três Pontas, MG. Potencialmente, os modelos podem ser aplicados na estimativa do IAF de uma planta isolada ou para parcelas homogêneas. Possuem a vantagem de uma representação mais realista da forma da planta no tempo e no espaço em comparação com métodos semelhantes. Com o método proposto espera-se atender às demandas de modelos de previsão de produtividade de cafeeiros reduzindo as limitações observadas nos métodos comumente utilizados para determinação do IAF.

Devido à importância de uma estimativa da produtividade do cafeeiro que indique valores próximos do real para toda

a cadeia produtiva do setor e para a economia brasileira, o presente trabalho teve como objetivo obter um método simples e preciso para realizar a estimativa da produção de café.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado dentro das lavouras cafeeiras do IFSULDEMINAS – Campus Machado. As unidades experimentais (UEs) foram montadas dentro das lavouras de quatro cultivares: Mundo Novo, Catuaí, Rubi e Topázio. A região do município de Machado compreende 587,1 km², com altitude com máxima de 1.310 m (cabeceira do córrego da Barra) e mínima de 835 m (foz do córrego Coroado). O clima é do tipo Cwa (Koppen) apresentando temperaturas moderadas, com verão quente e chuvoso. A temperatura média anual é de 21,2 °C; a média mensal máxima de 27 °C; a média mensal mínima de 14,2 °C e o índice pluviométrico médio anual é de 1.824 mm apresentando condições ecofisiológicas ideais para a boa produtividade do cafeeiro (DaMatta et al., 2007). Foram adotadas 4 UEs levando-se em consideração a cultivar, o espaçamento e a área amostrada (Tabela 1).

Todas as lavouras estudadas foram conduzidas com os melhores critérios agrônomicos, com adubação realizada a partir de análise de solo; controle de plantas daninhas, doenças e pragas efetuadas de acordo com a necessidade e com o acompanhamento do corpo técnico do IFSULDEMINAS.

As avaliações foram realizadas na última semana de fevereiro de 2011, posterior à época do fenômeno conhecido como “queda dos chumbinhos”. Dentro de cada Unidade Experimental (UE) foram avaliadas, aleatoriamente, 10 plantas; em cada uma delas foram marcados 6 ramos plagiotrópicos sendo 3 ramos de cada lado da rua (sol nascente e poente) a fim de amenizar o efeito da luminosidade; quanto aos três ramos, foram selecionados no terço superior, central e inferior do cafeeiro, totalizando 60 ramos plagiotrópicos por UE.

Avaliaram ainda a altura e o diâmetro da copa das plantas; a altura consistiu na distância entre o nível do solo até o ápice do ramo ortotrópico da planta. Para as avaliações foram coletados os frutos dos 4º e 5º internódios produtivos uma vez que, normalmente, esses internódios cresceram no ano anterior e representam o número de frutos da safra a ser avaliada. Além disso, a média de “chumbinhos”, ou frutos, naqueles dois internódios representa praticamente o mesmo número de “chumbinhos”, ou frutos, pertencentes a cada internódio produtivo dos ramos da planta (Alfonsi, 2008).

Neste trabalho foi avaliada a viabilidade de aplicação de três modelos matemáticos para a estimativa de produtividade os quais serão chamados, na sequência, índice fenológico de produção 1 (FP1), índice fenológico de produção 2 (IFP2) e índice fenológico de produção 3 (IFP3).

O IFP1 baseou-se na metodologia proposta por Oliveira (2007) sendo que a estimativa da produção pode ser calculada através da Eq. 1.

Tabela 1. Unidades experimentais avaliadas nos cafezais do IFSULDEMINAS-Campus Machado

Cultivar	Espaçamento (m)	Idade (anos)	Área (ha)	Número de plantas	CML* (m)
Topázio	4,0 x 0,6	5	1,0	4166	2500
Rubi	4,0 x 0,6	5	1,0	4166	2500
Catuaí	4,0 x 0,6	5	1,0	4166	2500
Mundo Novo	3,5 x 1,0	7	0,9	2857	2857

* CML - Comprimento das linhas de cafeeiro

$$IFP1 = MF45 \times (ALT \times 2) \times CML \quad (1)$$

onde:

IFP1 - índice fenológico produtivo de um hectare de café

MF45 - média de frutos presentes nos 4º e 5º nós produtivos a partir do ápice dos ramos plagiotrópicos

ALT x 2 - dobro da altura média das plantas, em metros em cada EU

CML - comprimento (m) de linha de cafeeiro por hectare obtido pela divisão de 10.000 pelo espaçamento (m) entre linhas das plantas.

No IFP2 substituiu-se, no modelo anterior, o dobro da altura pela soma da altura com o diâmetro da saia do cafeeiro, conforme demonstrado na equação (Eq. 2) proposta por Fahl et al. (2005).

$$IFP2 = MF45 \times (ALT \times D) \times CML \quad (2)$$

onde:

IFP2 - índice fenológico produtivo de um hectare de café

MF45 - média de frutos presentes nos 4º e 5º nós produtivos a partir do ápice, dos ramos plagiotrópicos

ALT - altura média das plantas, em metros em cada UE

D - diâmetro do cafeeiro medido na altura da saia

CML - comprimento (m) de linha de cafeeiro por hectare obtido pela divisão de 10.000 pelo espaçamento (m) entre linhas das plantas.

No IFP3 ajustou-se a metodologia proposta por Miranda (2003), que visa avaliar o volume de copa do cafeeiro dando origem ao modelo matemático (Eq. 3) em que se estabelece o volume da copa do cafeeiro pelo ajuste de duas formas espaciais, o cone e a pirâmide, conforme descrito na primeira operação da equação: $\{[(\pi \times D^2) \times ALT] / 4\} / 2$, a qual é multiplicada pelos MF45 e CML.

$$IFP3 = \frac{(\pi \times D^2) \times ALT}{2} \times \frac{1}{4} \times MF45 \times CML \quad (3)$$

onde:

IFP3 - índice fenológico produtivo de um hectare de café

π - número irracional de valor aproximado e fixo igual a 3,14

D^2 - diâmetro do cafeeiro medido na altura da saia elevado ao quadrado

ALT - altura média das plantas, em metro de cada UE

MF45 - média de frutos presentes nos 4º e 5º nós produtivos a partir do ápice, dos ramos plagiotrópicos

CML - comprimento (m) de linha de cafeeiro por hectare obtido pela divisão de 10.000 pelo espaçamento (m) entre linhas das plantas.

O índice fenológico de produção geral (IFPG) engloba as quatro cultivares analisadas independente de seu porte e de

estarem sendo analisadas isoladamente ou em grupo. Cada cultivar teve seu índice fenológico de produção calculado originando um ponto no gráfico. Os quatro pontos obtidos foram comparados com a produção amostrada de cada talhão e submetidos também à regressão linear simples; neste índice a altura considerada nos modelos foi encontrada através da média aritmética das alturas das 10 plantas amostradas em cada talhão; também foi utilizado o recurso da média aritmética quando foram considerados diâmetro da planta medido na altura da saia e média de frutos nos quarto e quinto internódios produtivos.

Com base na metodologia descrita foi realizada a colheita manual das plantas amostradas e dos talhões que constituíram as unidades experimentais. Os cafés foram separados no terreiro e posteriormente secados e beneficiados quando apresentavam a mesma umidade de 11,5% b.u.

Após a colheita dos frutos dos cafeeiros amostrados foram obtidos os valores reais da produtividade ($sc\ ha^{-1}$) de café beneficiado. A renda média foi de 460 L de café cereja para um saco de 60 kg de café beneficiado. Os dados foram submetidos à análise estatística no Software Sisvar (Ferreira, 2011).

Na Tabela 2 estão apresentados os valores da produtividade observada em cada UE estudada, no ano agrícola de 2010/2011 cuja produtividade variou de 26 a 53,7 $sc\ ha^{-1}$, ocorrendo uma produtividade maior para a cultivar Mundo Novo.

Tabela 2. Produtividade observada (PO) obtida nas UEs

Cultivar	Produtividade real (sacas ha^{-1})
Catucaí	29,8
Mundo Novo	53,7
Rubi	26,5
Topázio	26,0

No presente trabalho as regressões realizadas e analisadas foram desenvolvidas para cada cultivar a fim de se verificar as implicações isoladas no modelo matemático final, o que o diferencia dos trabalhos anteriores que visam a um modelo matemático amplo, válido para todas as cultivares.

Procedeu-se, então, ao ajuste de uma equação de regressão linear simples conforme a metodologia descrita por Oliveira (2007), com a reta passando pela origem, de acordo com a Eq. 4.

$$y_i = \beta x_i + e_i \quad (4)$$

em que:

y_i - valor observado da variável dependente, produtividade prevista de café sacas ha^{-1}

x_i - valor da variável independente (IFP)

β - coeficiente angular ou de regressão

e_i - erro aleatório associado a cada observação

A estimação do parâmetro β do modelo foi feita pelo método dos mínimos quadrados. Os modelos fenológicos de produtividade 1, 2 e 3 foram analisados utilizando-se dados independentes de produtividade para as quatro unidades experimentais. Os resultados foram avaliados mediante regressão linear simples com base no coeficiente de determinação (R^2).

O valor de R^2 indica a precisão dos dados, ou seja, o quanto a variável dependente é explicada pela independente (Carvalho et al., 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os dados da cultivar Rubi de porte baixo para a estimativa da produção em sacas por hectare a partir do emprego do IFP1, determinou-se a equação ($y = 0,0053X + 2,76$) presente na Figura 1A, sendo $\beta = 0,00053$ apresentando excelente ajuste ($R^2=0,8683$).

Cada ponto do gráfico representa uma das 10 amostras colhidas no talhão sendo que a regressão linear foi efetuada entre os valores do IFP1 de cada planta e a produção real da planta. Fahl et al. (2005) também encontraram o coeficiente $\beta = 0,0005$ ($R^2 = 0,989$) após a análise de 14 unidades experimentais espalhadas em alguns municípios da região de Garça em São Paulo, no período de final de fevereiro a março durante os anos agrícolas de 2000 a 2004, época de colheita dos dados, semelhante ao realizado no presente estudo.

A Figura 1B expõe a regressão linear obtida pelo modelo descrito como IFP2, quando foi obtido $\beta = 0,0005$, sendo R^2 foi igual a 0,8805. Observa-se, para a cultivar Rubi que a substituição da variável “dobro da altura” pela “soma da altura mais o diâmetro da saia do cafeeiro” acarretou apenas uma pequena melhora no coeficiente de determinação; todavia, o coeficiente β obtido foi praticamente o mesmo fato este passível de ser justificado pela arquitetura das plantas pertencentes a essa cultivar uma vez que a altura e o diâmetro do cafeeiro medido na altura da saia não apresentam muitas discrepâncias para ambas, evento que já não se repetirá com a cultivar Mundo Novo (Figura 4B). Não foram encontrados, na literatura, trabalhos avaliando o desempenho deste modelo matemático, o que justifica novos trabalhos com a aplicação do referido modelo para a cultivar Rubi.

Na Figura 1C observam-se os resultados da cultivar Rubi ao serem submetidos ao modelo matemático descrito como IFP3. Obteve-se $\beta = 0,00093$ e o R^2 encontrado após a regressão linear foi de 0,9123. Verifica-se, para a cultivar Rubi, que o melhor desempenho foi apresentado com o modelo matemático descrito

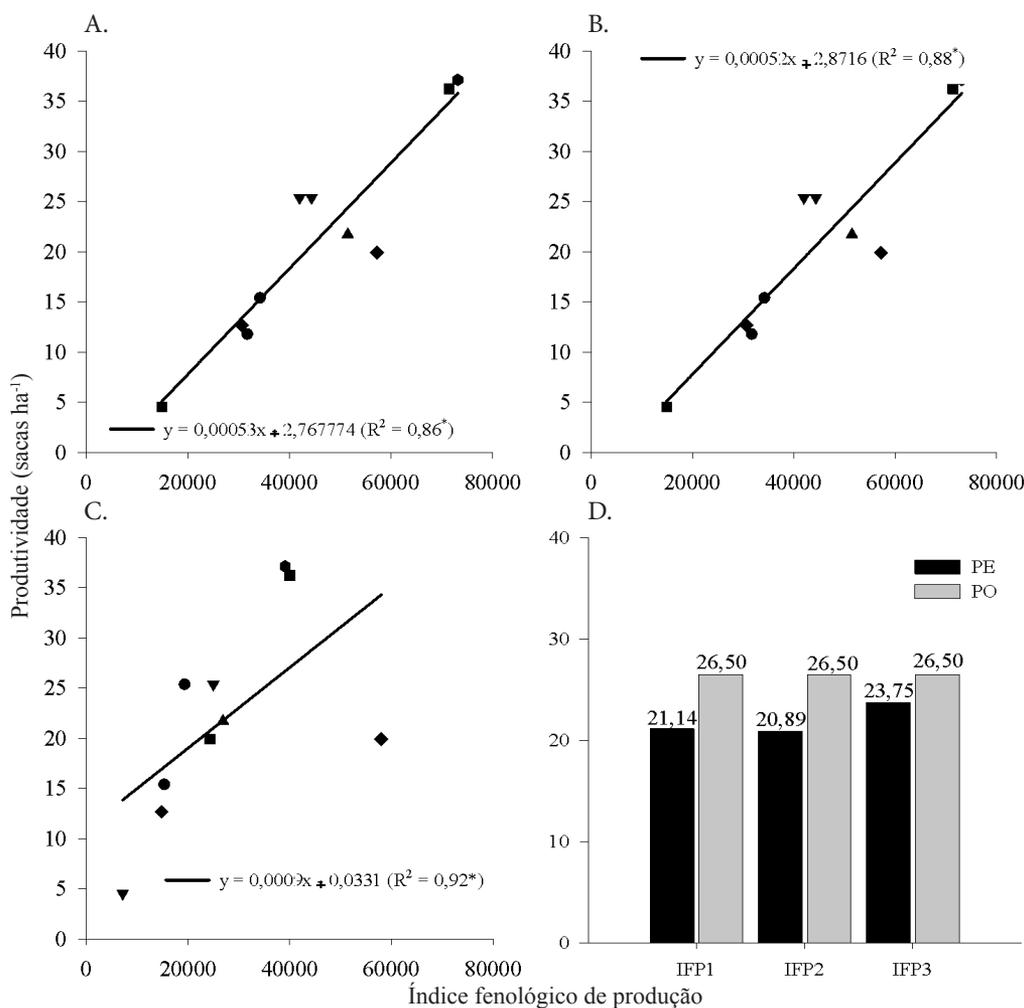


Figura 1. Índice fenológico de produção na cultivar Rubi em relação às equações matemáticas de previsão da produtividade do cafeeiro. Índice fenológico de produção do modelo IFP1 (A); Índice fenológico de produção do modelo IFP2 (B); Índice fenológico de produção do modelo IFP3 (C); Produtividade esperada e observada nos modelos matemáticos (D)

como IFP3; é provável que isto tenha porque este modelo tenta se aproximar mais da arquitetura do cafeeiro uma vez que a mesma não tem a forma exata de um cilindro nem de uma pirâmide mas de uma forma aproximada entre essas duas. A Figura 1D mostra o comportamento entre a produção observada e a produção estimada pelos três modelos matemáticos analisados para a cultivar Rubi. Consta-se que o modelo descrito como IFP3 foi o que mais se aproximou da produtividade real do talhão analisado no experimento e que os outros modelos apresentaram tendência de subestimar a produção final.

Para a cultivar Topázio, de porte baixo, a estimativa de sua produção a partir do IFP1 foi determinada por regressão linear resultando $\beta = 0,00053$ e um $R^2 = 0,8761$ (Figura 2A). Oliveira (2007) verificou, para o mês de março, uma equação com $\beta = 0,0005$ para as regiões do Cerrado e do Sul de Minas e com R^2 de 0,99 e 0,96, respectivamente sendo realizadas estimativas de produção para diferentes cultivares (Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo, Obatã, Acaiaí, Catucaí e Rubi). Para as regressões a mesma não separou os dados por cultivar mas por região; o coeficiente β encontrado pela mesma refere-se a todas as cultivares envolvidas no experimento.

Substituindo na regressão linear os dados do IFP1 pelos do modelo descrito como IFP2, nota-se que o R^2 se elevou para 0,8806 e $\beta = 0,00049$ (Figura 2B). A elevação discreta do coeficiente de determinação, da mesma forma que a proximidade entre as duas equações obtidas para esta cultivar (IFP1 e IFP2) sugere novamente que, por ser a cultivar Topázio uma variedade de porte baixo, sua altura muito se aproxima da medida do diâmetro medido na altura da saia. A substituição da variável “dobro da altura” pela “altura somada ao diâmetro da planta” não apresentou discrepâncias significativas o que também justifica a proximidade dos resultados apresentados entre ambas as equações.

Com relação ao IFP3 verifica-se, para a cultivar Topázio, que o resultado encontrado foi um coeficiente de determinação de 0,9126 e $\beta = 0,0013$. Para a cultivar este último modelo também apresentou comportamento estatístico melhor.

A Figura 2D apresenta a comparação entre a produção observada e a produção estimada pelos três modelos matemáticos para a cultivar Topázio. As diferenças apresentadas pelos dois modelos na aplicação das equações obtidas são muito discretas; enfim, os três modelos apresentaram leve tendência de superestimar a produção final.

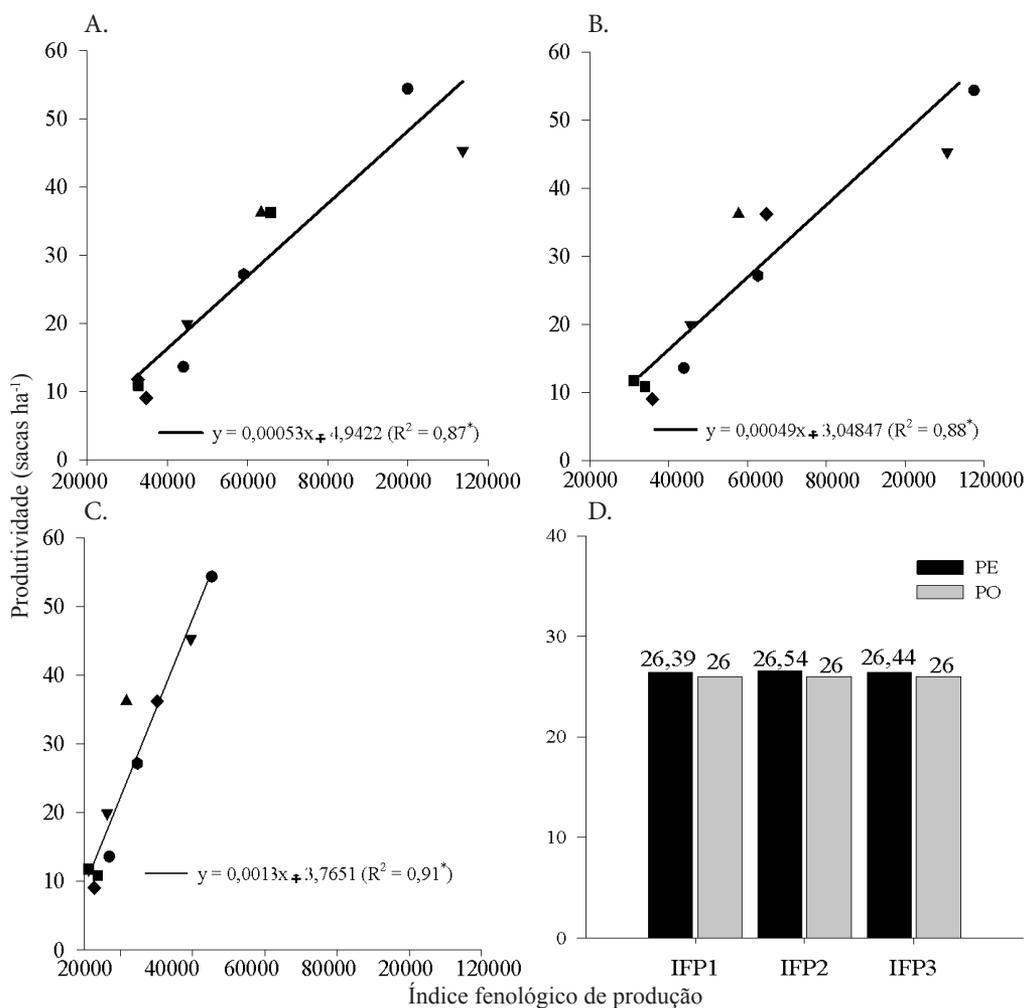


Figura 2. Índice fenológico de produção da cultivar Topázio em relação às equações matemáticas de previsão da produtividade do cafeeiro. Índice fenológico de produção do modelo IFP1 (A); Índice fenológico de produção do modelo IFP2 (B); Índice fenológico de produção do modelo IFP3 (C); Produtividade esperada e observada nos modelos matemáticos (D)

Considerando o resultado obtido para a cultivar Catucaí classificada como de médio porte, verifica-se que a regressão linear efetuada a partir do IFP1 encontrou coeficiente $\beta = 0,00064$ e coeficiente de determinação de 0,90443 (Figura 3A). O resultado obtido está semelhante ao encontrado por Oliveira (2007) comprovando que as equações podem sofrer pequenas modificações conforme as características da cultivar analisada. No trabalho Oliveira (2007) utilizou diversas cultivares para produzir uma única regressão geral não sendo possível mensurar com exatidão até que ponto uma cultivar poderia influenciar o resultado geral.

Os dados do IFP2 para a mesma cultivar (Figura 3B) encontraram $\beta = 0,0007$ e um R^2 de 0,8977 em que o último sofreu uma diminuição ínfima quando comparado ao IFP1; já a diferença entre os coeficientes obtidos foi um pouco maior mas, mesmo assim, discreta, demonstrando que para esta cultivar também não ocorreram alterações significativas ao se substituir a variável “dobro da altura” pela variável “altura somada com o diâmetro da planta”. Quando os dados foram submetidos ao modelo matemático IFP3 (Figura 3C) se encontraram $\beta = 0,0014$ e um R^2 igual a 0,8969 o que demonstra que o modelo descrito

como IFP3 se comporta bem para as cultivares de menor porte tal como para esta de pequeno/médio porte, apresentando bom nível de eficiência.

A comparação entre a aplicação prática das equações encontradas nos três modelos matemáticos e a produção observada no talhão analisado referente à cultivar Catucaí, é mostrada na Figura 3D; as diferenças não chegam a ser significativas e ambos os modelos apresentaram tendência de subestimar a produção esperada.

Para a cultivar Mundo Novo, considerada de porte alto, os resultados obtidos com o emprego do IFP1 foram um R^2 de 0,894111 e $\beta = 0,00083$, como mostra a Figura 4A. O coeficiente encontrado com a regressão linear demonstrou, mais uma vez, um distanciamento dos coeficientes encontrados por Oliveira (2007) e Fahl et al. (2005) sugerindo que há diferenças entre os coeficientes obtidos quando se considera cada cultivar isoladamente. Como os coeficientes de determinação encontrados por ambos os pesquisadores superaram os deste trabalho sinalizando a necessidade de novos estudos para a cultivar envolvida a fim de se verificar qual dos dois coeficientes encontrados para o mesmo modelo apresentará melhor

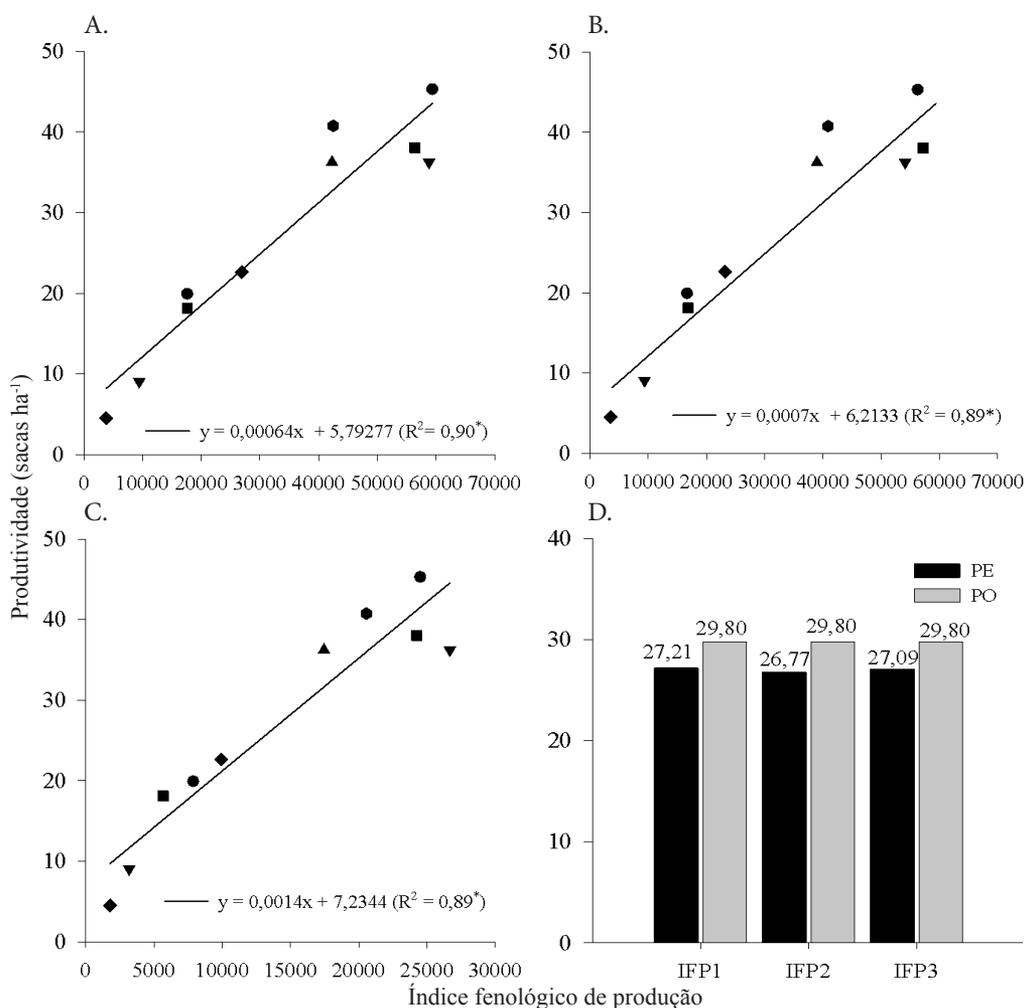


Figura 3. Índice fenológico de produção da cultivar Catucaí em referência às equações matemáticas de previsão da produtividade do cafeeiro. Índice fenológico de produção do modelo IFP1 (A); Índice fenológico de produção do modelo IFP2 (B); Índice fenológico de produção do modelo IFP3 (C); Produtividade esperada e observada nos modelos matemáticos (D)

resultado, isto é, aquele com melhor R^2 obtido da regressão entre diversas cultivares ou o que apresentou um R^2 um pouco mais baixo obtido somente com dados da cultivar Mundo Novo.

Analisando os dados do IFP2 (Figura 4B) verifica-se que este modelo matemático perde eficiência quando comparado com o modelo do IFP1 na medida em que a altura da planta começa a se distanciar da medida do diâmetro do cafeeiro, fato que repercute no coeficiente de determinação, R^2 ; já o coeficiente β encontrado se aproxima do obtido no mesmo modelo para as cultivares Rubi e Topázio porém se distancia do obtido para a cultivar Catucaí.

Na Figura 4C estão representados os resultados quando se considera o modelo descrito como IFP3, sendo que $\beta = 0,0005$ e o R^2 de 0,9431. Novamente este modelo matemático, por buscar se aproximar mais do formato da arquitetura da planta, mostrou-se mais eficiente que os descritos como IFP1 e IFP2. Estão também representadas as produtividades observadas e estimadas pelos modelos matemáticos (Figura 4D). O modelo descrito como IFP3 foi o que mais se aproximou da produção real do talhão analisado, com leve tendência de superestimar a produção, ou seja, mesma tendência apresentada pelo modelo

IFP1; já no modelo IFP2 a tendência foi subestimar a safra para a cultivar Mundo Novo.

Para a cultivar Mundo Novo, considerada de porte alto, os resultados obtidos com o emprego do IFP1 foram um R^2 de 0,894111 e $\beta = 0,00083$, como mostra a Figura 4A. O coeficiente encontrado com a regressão linear demonstrou, mais uma vez, distanciamento dos coeficientes encontrados por Oliveira (2007) e Fahl et al. (2005), sugerindo haver diferenças entre os coeficientes obtidos quando se considera cada cultivar, isoladamente. Visto que os coeficientes de determinação encontrados por ambos os pesquisadores superaram o deste trabalho indicando a necessidade de novos estudos para a cultivar envolvida visando verificar qual dos dois coeficientes encontrados para o mesmo modelo apresentará melhor resultado, isto é, aquele com melhor R^2 porém obtido da regressão entre diversas cultivares ou, ainda, o que apresentou um R^2 um pouco mais baixo mas que foi criado somente com dados da cultivar Mundo Novo.

A comparação entre os dados do IFP2 (Figura 4B) demonstrou queda de eficiência deste modelo matemático em relação ao modelo IFP1, na medida em que a altura da planta

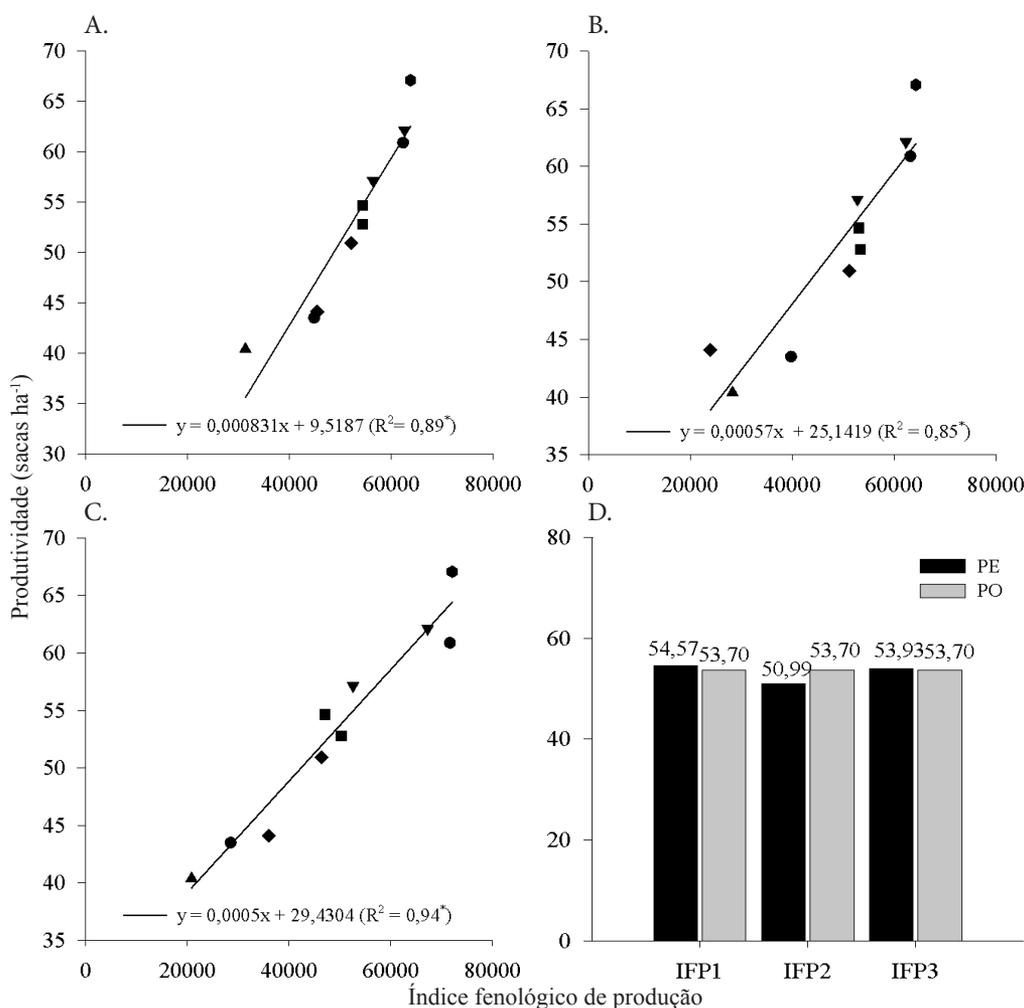


Figura 4. Índice fenológico de produção da cultivar “Mundo Novo” em relação às equações matemáticas de previsão da produtividade do cafeeiro. Índice Fenológico da Produção IFP1 (A); Índice Fenológico da Produção IFP2 (B); Índice fenológico de produção IFP3(C); Produtividade esperada PO e observada PE nos modelos matemáticos (D)

começa a se distanciar da medida do diâmetro do cafeeiro, fato que repercute no coeficiente de determinação (R^2) enquanto o coeficiente β encontrado se aproxima do obtido no mesmo modelo para as cultivares Rubi e Topázio mesmo se distanciando do obtido para a cultivar Catucaí.

Na Figura 4C se encontram os resultados em relação ao modelo descrito como IFP3, sendo que $\beta = 0,0005$ e o R^2 de 0,9431; mais uma vez este modelo matemático se aproximou mais da arquitetura real da planta sendo mais eficiente, portanto, que os descritos como IFP1 e IFP2. A Figura 4D apresenta as produtividades observadas e estimadas pelos modelos matemáticos. O modelo descrito como IFP3 foi o que mais se aproximou da produção real do talhão analisado com leve tendência de superestimar a produção; esta mesma tendência foi apresentada pelo modelo IFP1; no modelo IFP2 a tendência foi de subestimar a safra visando à cultivar Mundo Novo.

Calculou-se o coeficiente de correlação entre os índices fenológicos de cada um dos três modelos matemáticos com a produtividade observada nas plantas amostradas. Verificou-se que os dados amostrais apresentaram bons coeficientes de correlação, todos acima de 0,93 cujos melhores índices foram registrados pela cultivar Mundo Novo, sinalizando que a utilização do índice fenológico utilizado para o cálculo da produtividade prevista está altamente correlacionado com a produtividade observada (Tabela 3).

Com esses resultados foi realizada a correlação entre os índices fenológicos obtidos dentro de cada modelo, denominado índice fenológico da planta geral (IFPG), com a produtividade observada, independente das cultivares. O coeficiente de correlação entre os índices fenológicos de produção (IFP1, 2 e 3) e a produtividade observada foi para IFPG1 de 0,4089; IFPG2 de 0,2541 e a IFPG3 de 0,9159. Portanto, em análise conjunta de todos os índices fenológicos calculados para todas as cultivares dentro de cada modelo, o índice fenológico de produção geral (IFPG3) apresentou correlação altamente significativa em referência à produção observada.

Verificou-se, sem distinguir as cultivares, que os resultados obtidos para os modelos descritos como IFPG1 e IFPG2 tiveram um R^2 não significativo demonstrando a necessidade de, para estudos futuros, se aumentar o número de plantas amostradas e de cultivares para melhor analisar o comportamento dos modelos citados por cultivar estudada e para a cultura de café arábica, como um todo; pode-se, então, afirmar que, juntando todas as cultivares de café numa única regressão, os trabalhos estão corretos ou, também, se os resultados poderiam ser melhores se fossem criados modelos de estimativa de produtividade específicos para cada cultivar, dada à especificidade de cada uma.

Destaca-se ainda, aplicando-se o modelo descrito como IFPG3, que a regressão geral entre as quatro cultivares, foi

Tabela 3. Coeficientes de correlação entre os índices fenológicos de produção e a produtividade observada

Cultivar	IFP1	IFP2	IFP3
Rubi	0,9318	0,9383	0,9513
Topázio	0,9360	0,9384	0,9553
Catucaí	0,9510	0,9472	0,9470
Mundo Novo	0,9846	0,9509	0,9715

a que demonstrou a melhor eficiência com coeficiente de determinação 0,839 (Figura 5); este modelo mostrou-se aplicável para a estimativa de safra das quatro cultivares analisadas separadamente ou conjuntamente. O coeficiente de correlação entre os índices fenológicos de produção geral 1, 2 e 3 e a produtividade observada também indicou que o modelo 3 foi o único que apresentou resultado satisfatório com aproximadamente 0,91.

Os modelos (IFPG 1 e 2) utilizados são semelhantes porém no modelo IFPG3 são levados em consideração dois fatores importantes para avaliar produtividade do cafeeiro sem se considerar a cultivar utilizada; o primeiro está relacionado à arquitetura do cafeeiro que apresenta volume de copa variando entre um cilindro para as cultivares de porte alto (Mundo Novo), até uma pirâmide para as cultivares de porte baixo (Catucaí, Caturra, Obatã); no geral, porém, a maioria das cultivares apresenta uma arquitetura intermediária entre essas duas formas espaciais. Portanto, ao se adotar a equação (Eq. 3), proposta por Miranda (2003), ajusta-se esta tendência da copa do cafeeiro apresentar esta variação de volume de copa entre o cilindro e a pirâmide. Segundo Miranda (2003), os fatores que determinarão este cálculo serão o diâmetro e a altura do cafeeiro, sendo a cultivar adotada com suas características fenotípicas que irá influenciar no resultado do cálculo final, o que está de acordo também com Barbosa et al. (2012), que utilizaram a altura das plantas e o comprimento dos ramos plagiotrópicos para estimar as variações do IAF em função do volume de folhas.

É importante destacar que, diante do problema existente no Brasil no tocante à estimativa antecipada da safra de café, a busca por um modelo confiável e que apresente o maior índice de confiança, se constitui em uma fonte de estudos rica para pesquisadores da área de exatas e agronomia. O presente trabalho buscou desenvolver uma metodologia simples e aplicável capaz de envolver qualquer pessoa, mesmo que sem muita experiência, na problemática da previsão antecipada de safra de café realizada, atualmente, de forma subjetiva (visual).

Os modelos testados e comparados no presente trabalho se mostraram como boas ferramentas; entretanto, estudos

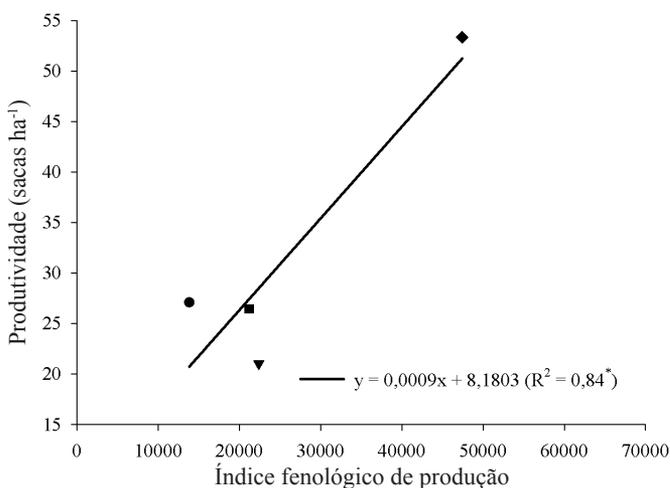


Figura 5. Regressão linear simples entre a produtividade observada e o índice fenológico de produção geral (IFP3) obtidos nas quatro cultivares analisadas

futuros devem ser realizados com o intuito de avaliar melhor a aplicabilidade dos modelos matemáticos descritos como IFP2 e IFP3 pois, como já foi citado, são viáveis e a facilidade de aplicação de ambos pode contribuir para que o máximo de interações positivas possa ser identificado e que mais respostas possam ser dadas às seguintes perguntas: Qual a melhor época para se efetuar a coleta de dados para esses dois modelos? Ocorrem variações na aplicação desses modelos para as diferentes regiões produtoras de café do Brasil? Como esses modelos se comportam para a estimativa de safra de talhões maiores? Com a resposta para essas perguntas propostas e outras aqui nem citadas, muito ainda se pode evoluir na estimativa da produção de café de uma propriedade, município, estado ou país.

CONCLUSÕES

1. Existe uma correlação positiva entre os modelos matemáticos (IFP1 e 2) e a arquitetura de copa do cafeeiro, sendo necessária a escolha do melhor modelo para uma cultivar de porte baixo, intermediário ou alto.

2. As regressões lineares demonstraram que o modelo matemático descrito como índice fenológico de produção 3 (IFP3), apresentou a melhor eficiência para as quatro cultivares independentemente de seu porte e de estarem sendo analisadas isoladamente ou em grupo.

LITERATURA CITADA

- Alfonsi, E. L. Uso de índices fenológicos em modelos de previsão de produtividade do cafeeiro. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 104p. Tese Doutorado
- Assad, D. E.; Marin, R. F.; Evangelista, S. R.; Pilau, F. G.; Farias, J. R. B.; Pinto, H. S. Sistema de previsão de safra de soja para o Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.615-625, 2007.
- Barbosa, J. P. R. A. D.; Martins, G. A.; Ferreira, R. T.; Pennacchi, J. P.; Souza, V. F.; Soares, A. M. Estimativa do IAF de cafeeiro a partir do volume de folhas e arquitetura da planta. *Coffee Science*, v.7, p.267-274, 2012.
- Camargo, A. P. de; Camargo M. B. P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, v.60, p.65-68, 2001.
- Carvalho, L. G.; Sedyama, G. C.; Cecon, P. R.; Alves, H. M. R. A. Avaliação de um modelo agrometeorológico para previsão da produtividade de café em três localidades da região Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.11, p.343-352, 2003.
- Carvalho, L. G.; Sedyama, G. C.; Cecon, P. R.; Alves, H. M. R. A regression model to predict coffee productivity in Southern Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, p.204-211, 2004.
- DaMatta, F. M.; Ronchi, C. P.; Maestri, M.; Barros, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.19, p.485-510, 2007.
- Fahl, J. I.; Carelli, M. L. C.; Alfonsi, E. L.; Camargo, M. B. P. Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estimativa da produtividade do cafeeiro, utilizando as características fenológicas determinantes do crescimento e produção. In: Simpósio de pesquisas dos cafés do Brasil, 4., 2005, Londrina. Anais...Brasília, 2005. CD-Rom
- Ferreira, D. F. Sisvar: Um sistema computacional de análise estatística. *Ciência e Agrotecnologia*, v.35, p.1039-1042, 2011.
- Miranda, J. M. Avaliação de progênies de cafeeiro quanto a herdabilidade, correlações fenotípicas, produtividade e resistência à ferrugem. Jaboticabal: UNESP, 2003, 101p. Tese Doutorado
- Oliveira, D. A. Estimativa da produção de café por meio de índice fenológico. Lavras: UFLA, 2007. 20p. Dissertação Mestrado
- Pereira, S. P.; Bartholo, G. F.; Baliza, D. P.; Sobreira, F. M.; Guimarães, R. J. Crescimento, produtividade e bienalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, p.152-160, 2011.
- Pezzopani, C. G.; Favarin, J. L.; Maluf, M. P.; Pezzopani, J. R. M.; Guerreiro Filho, D. Atributos fenológicos de cafeeiro arábica. *Ciência Rural*, v.39, p.711-717, 2009.
- Ramirez, G. A.; Zulo Júnior, J. Estimativa de parâmetros biofísicos de plantas de café a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.231-238, 2010.
- Rosa, V. G. P.; Moreira, M. A.; Rudorff, B. F. T.; Adami, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.1478-1488, 2010.
- Santos, M. A.; Camargo, M. B. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. *Bragantia*, v.65, p.173-183, 2006.
- Silva, F. M.; Alves, M. C.; Souza, J. C. S.; Oliveira, M. S. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.34, p.625-632, 2010.
- Zacharias, A. O.; Camargo, M. B. P.; Fazuoli, L. C. Modelo agrometeorológico de estimativa do início da florada plena do cafeeiro. *Bragantia*, v.67, p.249-256, 2008.